

蒸汽管道保温层优化设计分析

张振星

中核第七研究设计院有限公司 山西 太原 030000

摘要: 针对中核厂区现有高温蒸汽管道保温层适配性差、热损耗高、服役寿命短等工程问题, 本文梳理传统保温设计在材料选型、结构布局、厚度取值方面的核心缺陷。结合核电专属工况, 构建兼顾热力性能、工程造价、耐久性能的多目标优化模型, 依托遗传算法完成参数迭代求解。通过差异化选材、双层复合结构改造、分工况经济厚度核算完成分项优化设计。结果表明, 该优化方案可有效降低管道热损失, 控制施工运维成本, 提升保温结构对辐照、潮湿、振动工况的适配能力, 可为核电蒸汽管道保温设计提供工程参考。

关键词: 蒸汽管道; 保温优化; 优化模型构建; 分项优化设计

引言: 高温蒸汽管道是核电厂热力系统的核心构筑物, 其保温层设计质量直接关系厂区能耗管控、设备运行安全及运维成本。核电厂区存在辐照环境、室外潮湿气候与管线持续振动等特殊工况, 通用民用热力管道保温设计方案难以适配现场需求。现阶段厂区在用蒸汽管道保温层普遍存在材料耐候性不足、结构设计不合理、厚度取值粗放等问题, 导致管道散热超标、保温层易破损脱落。为解决上述工程痛点, 本文结合现场实测数据, 通过模型构建与分项优化, 开展保温层系统化优化设计, 提升管道保温工程的实用性与经济性。

1 现有蒸汽管道保温层设计核心缺陷

结合中核厂区在用高温蒸汽管道现场勘测、传热检测及图纸复盘, 现有保温层沿用传统通用设计方案, 未贴合核电厂区辐照、室外潮湿、管线振动专属工况, 整体设计适配性不足, 多项参数不符合现行核电热力管道设计标准, 核心缺陷如下: (1) 保温材料选型针对性不足。现有管线统一选用普通硅酸铝保温棉, 未区分直管、异形管件、管沟敷设工况选材, 普通保温材料耐辐照等级偏低, 长期服役易出现粉化、压缩塌陷; 材料疏水性能较差, 室外管段雨水沿保护层缝隙渗入保温内层, 材料含水率升高后导热系数大幅上涨, 管道散热损耗超标, 且材料阻燃等级无法满足核电厂房防火分区专项要求。(2) 保温结构分层设计不合理。现有保温多采用单层等厚保温构造, 未依据管壁高温梯度做分层适配, 内层耐高温承载力不足, 外层保温冗余加厚; 管道法兰、弯头、支架交接位置未做异形一体化保温设计, 拼接缝隙较多, 形成固定散热薄弱点, 局部热损失可达直管段 2 倍以上。(3) 保温厚度取值粗放、节点构造缺失。设计仅套用民用热力管道

标准厚度, 未结合核电蒸汽高温高压参数核算经济厚度, 部分管段厚度偏大提升施工成本, 受限管段厚度偏小存在烫伤隐患; 保护层搭接、收口密封构造简化处理, 无防水压条、防腐垫层配套设计, 后期极易出现开裂脱层, 缩短保温整体服役年限^[1]。

2 蒸汽管道保温层多目标优化模型构建

2.1 优化设计目标选取

依据核电管道保温设计硬性指标, 确定三项并行优化目标, 目标之间相互制衡, 无主次优先级, 贴合工程同步管控要求。(1) 热力优化目标: 控制管道稳态单位面积热损失, 以 GB50264 热力管道热损失限值为基准, 限定保温外壁散热通量, 控制异形管件局部热溢出, 降低管道径向传热差值, 满足厂区热力能耗管控指标。(2) 经济优化目标: 核算保温结构全生命周期成本, 涵盖主材采购、人工安装、后期维保、拆除更换费用, 不计远期节能收益, 仅优化保温施工及运维固有造价, 避免保温材料、厚度过度冗余造成造价超标。(3) 耐久优化目标: 提升保温结构工况适配性, 限定材料长期辐照老化系数、浸水导热衰减率, 适配厂区室外雨淋、设备低频振动环境, 降低保温层开裂、粉化、分层脱落概率。

2.2 优化模型变量与约束参数设定

本次模型变量全部采用可控工程变量, 边界约束贴合核电现场实测数值, 杜绝理论虚拟参数。(1) 模型自变量: 分为材质变量与结构变量两类, 材质变量选取气凝胶、改性硅酸铝、阻燃岩棉三类核电常用保温主材; 结构变量分为内层耐高温厚度、外层保温厚度、铝合金保护层搭接宽度三项变量, 变量取值严格贴合现场管

道安装空间限值。(2)模型等式约束:管道蒸汽介质温度 280~320℃,环境年均温度 8~32℃,室外年均风速 2.2m/s,管壁导热系数固定取值,多层保温界面温度满足材料耐温临界值。(3)模型不等式约束:管道外壁触摸温度 $\leq 45^{\circ}\text{C}$;保温成品外径不大于管道检修预留间距;保温材料燃烧性能 A 级;单层保温施工厚度不大于 100mm,规避施工空鼓拼接缺陷。

2.3 基于遗传算法的多目标求解模型搭建

依托遗传算法完成多目标耦合求解,适配保温非线性传热计算特点,规避传统迭代计算收敛偏差问题,建模步骤贴合工程仿真标准。(1)目标函数归一化处理:将热损失、造价、耐久系数三项非标目标函数做无量纲归一换算,构建综合优化目标函数,消除温度、造价、性能单位差值带来的计算误差,统一算法计算维度。(2)算法参数赋值:设定种群规模 60,交叉概率 0.72,变异概率 0.08,最大迭代次数 120 次,贴合管道保温参数小幅迭代优化特征,避免迭代过度导致参数脱离施工实际范围。(3)模型边界校验修正:导入雨天浸水、设备振动两类扰动参数,修正算法内部导热计算因子,剔除不符合核电防火、耐辐照标准的解值,输出可行域内最优一组保温参数组合,保证求解结果可直接落地施工,无需二次参数修正。在完成全部迭代运算后,整理帕累托解集并采用加权决策筛选唯一最优方案,对比单一目标计算结果可明显看出,该算法能够平衡散热、成本与使用寿命三方需求,有效解决单一维度优化带来的设计短板,为后续保温材料选型、结构配置与厚度取值提供定量计算依据^[2]。

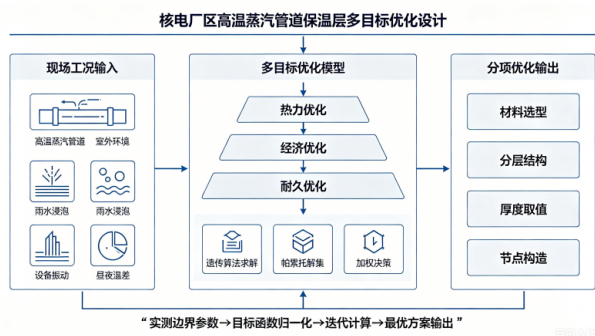


图1 蒸汽管道保温层多目标遗传算法优化模型技术流程图

上图(图1)展示了核电厂区高温蒸汽管道保温层多目标优化模型的构建逻辑。模型以现场实测工况与边界参数为输入,综合考虑热损失、全生命周期造价和耐久

性能三项优化目标,通过目标函数归一化与遗传算法迭代求解,在防火、耐温、外径空间、外壁温度等约束条件下筛选可行解集。最终输出材料选型、分层结构、经济厚度和节点构造等优化方案,为蒸汽管道保温设计提供定量决策依据。

3 蒸汽管道保温层材料、结构及厚度分项优化设计

3.1 适配核电工况保温材料选型优化

结合管道管壁温度梯度、厂区环境介质、防火耐辐照硬性指标,对原有单一硅酸铝保温材料替换优化,区分直管段、异形管件、密闭管沟三类场景差异化选材,开展材料性能对标筛选,确定分级选材方案。(1)常用保温主材基础性能对标。选取厂区现有在用三类 A 级阻燃保温材料开展工况适配检测,第一类普通岩棉:常温导热系数 $0.042\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,耐温上限 450°C ,抗辐照性能差,受潮后导热系数增幅 62%,仅适用于外围辅助低温蒸汽支管;第二类改性硅酸铝纤维棉:高温导热系数 $0.051\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,耐温上限 650°C ,抗挤压强度低,长期振动易粉化脱落,适配常规主干直管干燥管段;第三类疏水纳米气凝胶毡:高温导热系数 $0.023\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,耐温上限 700°C ,吸水率低于 1.5%,具备低剂量抗辐照能力,抗压成型性优良,适配高温主管、室外裸露管段及异形构件。(2)分区选材优化原则。一是高温主管选材:介质温度高于 290°C 主干蒸汽管道,内层选用 20mm 气凝胶毡,替代原有加厚硅酸铝层,缩减保温外径;二是常规支管选材:介质温度 $220\sim 280^{\circ}\text{C}$ 管道,保留改性硅酸铝材料,控制材料采购成本;三是特殊区域选材:厂房防火分区、反应堆临近管段,全部采用无石棉疏水保温主材,满足核电卫生及辐照管控要求;四是配件选材:密封收口、缝隙填充部位配套柔性保温腻子,杜绝硬质材料拼接空隙^[3]。

3.2 保温分层结构优化设计

原有保温统一采用单层整体包覆结构,界面温差应力集中、管件拼接缝隙量大,结合管壁温度梯度,优化为双层复合标准化结构,同时完善节点构造,消除结构性散热缺陷。(1)直管段双层复合结构优化。取消原有等厚单层保温构造,采用“内层耐温+外层保温”分层模式。内层贴合金属管壁,承担高温热传导,选用高密度硬质保温基材,抵抗管壁热辐射及高频振动形变,单层分层厚度不大于 60mm;外层承担隔热控温功能,选用低密度柔性保温材料,适配外形包覆施工,分层之间增设玻纤隔离防渗层,阻断水汽层间渗透。分层搭接缝错开布置,错缝间距不小于 80mm,规避通缝散热问题。(2)异形管件专项结构优化。针对法兰、弯

头、阀门、管道支吊架四类散热薄弱部位定制模块化保温结构。法兰位置采用分体卡扣式保温壳,预留螺栓拆卸检修空间,接口加装橡胶防水压条;弯头位置采用预制定型弧形保温块,禁止现场裁切拼接;管道承重支架位置增设隔热垫块,隔断金属支架径向导热通道;管道穿墙、穿楼板位置,保温层与墙体间隙填充阻燃封堵材料,缩小贯通散热缝隙。(3)外层防护结构配套优化。淘汰原有薄铁皮简易搭接保护层,室外管道采用0.6mm铝合金压型板,搭接宽度统一控制40mm,顺水流方向排布;密闭管沟管道采用镀锌彩钢板保护层,板缝打耐候密封胶;保护层端部、管口位置做翻边收口,杜绝雨水倒灌进入保温内部,提升结构整体耐久性。(4)接缝密封与隔汽防潮系统优化。构建双层递进密封构造,内层分层拼缝涂刷厚度2.5mm耐高温密封腻子预封堵,外层板缝通长施打宽度12mm耐候阻燃密封胶。每隔2.5m设置一处 $\varnothing 8$ 透气排湿孔,排出内部凝结水汽;室内低温管内侧增设厚度0.08mm铝箔整体隔汽层,阻隔外界水汽渗入。所有密封施工环境相对湿度控制 $\leq 75\%$,预留多处可拆卸检修点位,既杜绝缝隙渗水造成保温受潮失效,也便于后期局部渗漏检修维护,长期稳定控制整体散热损耗^[4]。

3.3 经济保温厚度仿真优化计算

依托前文遗传算法优化模型,结合管道公称直径、介质温度、环境风速、材料单价,核算稳态传热下经济保温厚度,区别于国标通用定值厚度,分工况精准取值,杜绝厚度冗余或厚度不足问题。(1)厚度计算基础边界参数。固定核算参数:饱和蒸汽介质压力1.6MPa,介质温度300℃,厂区室外年均环境温度16℃,年均风速2.3m/s,管壁碳钢导热系数48W/(m·K),外壁安全控制温度 $\leq 45^\circ\text{C}$;造价参数计入材料、安装、维保综合单价,设定管道设计服役年限15a,以此核算临界经济厚度。(2)不同管径直管段最优厚度取值。DN50及以下小口径支管:双层保温总厚度60mm,内层气凝胶20mm+外层硅酸铝40mm;DN80-DN150中口径主管:双层保温总厚度80mm,内层气凝胶25mm+外层硅酸铝55mm;DN200及以上大口径主干管道:双层保温总厚度100mm,内层气凝胶30mm+外层硅酸铝70mm;所有管

径管件保温厚度同比直管段加厚15%,抵消拼接缝隙散热损耗。(3)特殊工况厚度修正规则。一是露天迎风管段:厚度上浮10%,抵消对流换热散热增量;二是密闭管沟无风管段:厚度下调8%,减少保温材料冗余用量;三是冬季极低温厂区管段,仅优化外层保温厚度,不改动内层耐高温基材厚度,保证结构耐温稳定性;四是管线空间受限管段,不加大保温厚度,直接替换高导热气凝胶材料,实现空间与保温性能平衡。(4)厚度校核管控要求。所有优化后保温厚度,均核验管道外径、检修间距合规性,厂区桥架并排敷设管道,保温后净距保留 $\geq 50\text{mm}$,满足后期巡检、测温施工空间,厚度取值兼顾传热指标、工程造价、施工空间三重条件^[5]。

结束语: 本文结合核电厂区特殊运行工况,完成蒸汽管道保温层缺陷分析、多目标优化模型搭建及分项优化设计工作。通过材料分区选型、分层结构改造、精准厚度校核,有效解决了传统保温设计热损耗大、耐久性弱、造价不合理等问题。优化方案兼顾了热力稳定性、工程经济性与工况适配性,契合核电管道安全运行与节能管控要求。后续可结合长期现场运行数据,持续优化模型参数,进一步提升保温结构的长期服役性能与工程适配效果。

参考文献

- [1] 曹凯,鲍文龙,赵坤,姜浩涌,殷兴磊.蒸汽管道保温层性能恶化对其经济性的影响[J].山东科学,2025,38(1):74-82+95.
- [2] 许臻,江剑,熊帅敏,张琪琛,范勇刚,唐茂平.增城9H级联合循环机组主蒸汽及再热蒸汽系统管道设计优化[J].电力勘测设计,2025(9):74-78.
- [3] 王凯,何文福,杨杰,丁振坤,卢强,孔德睿,李佳禹.基于主蒸汽管道线型优化的隔震核电厂抗震性能提升与易损性研究[J].核动力工程,2026,47(2):245-254.
- [4] 吴培金.新型高温蒸汽管道节能保温装置的设计与性能研究[J].广州化工,2026,54(1):167-169.
- [5] 张世杰,郑志强,周立,翟传刚,程森.超超临界二次再热机组主蒸汽管道应力分析与优化设计[J].电力系统装备,2026(2):78-80.