

石油化工工艺装置蒸汽管道关键技术研究

刘亚萍 (天津博迈科海洋工程有限公司, 天津 300171)

摘要: 蒸汽管道在石油化工装置中承担高温热能传输任务, 运行条件复杂。本文针对典型蒸汽系统运行形态, 研究内容聚焦管材等级分区、补偿构件布置方式、保温隔热构造体系、排凝路径组织方式、焊接接头检验程序等关键环节, 形成适用于多区域蒸汽管网的工程化技术路线。工程案例以海洋平台能源模块蒸汽系统为对象, 记录并分析验证温度偏差、热位移偏差、排凝次数、外护层紧固检点偏差、焊缝返修率等指标的优越性, 为相关装置蒸汽管网建设与管理提供方法支撑。

关键词: 蒸汽管道; 热补偿; 保温隔热; 排凝布置; 焊接检验

中图分类号: TE6 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 034-0091-03

Research on Key Technologies of Steam Pipelines in Petrochemical Process Equipment

Liu Yaping (Tianjin Bomaike Marine Engineering Co., LTD., Tianjin 300171, China)

Abstract: Steam pipelines in petrochemical plants undertake the task of transmitting high-temperature thermal energy and operate under complex conditions. This paper focuses on the operation mode of typical steam systems. The research content centers on key links such as pipe material grade zoning, compensation component layout methods, thermal insulation and heat preservation construction systems, condensate drainage path organization methods, and welding joint inspection procedures, to form an engineering technical route suitable for multi-regional steam pipe networks. The engineering case takes the steam system of the energy module of the offshore platform as the object, records and analyzes to verify the superiority of indicators such as temperature deviation, thermal displacement deviation, decondensation frequency, deviation of outer protective layer fastening inspection, and weld rework rate, providing method support for the construction and management of the steam pipeline network of related facilities.

Keywords: Steam pipeline Thermal compensation Thermal insulation and heat preservation Condensate discharge arrangement Welding inspection

在石油化工生产过程中, 蒸汽作为高温热能载体被广泛应用于反应器加热、工艺流程驱动与能量传递环节, 具有使用频率高、覆盖范围广、热工负荷大的运行特征^[1]。蒸汽管道作为传输主干, 其结构安全性与系统连续性直接影响装置运行稳定程度与热能利用效率^[2]。实际运行中, 蒸汽系统面临温压耦合、冷热循环、介质腐蚀、结构约束、水击冲击等多因素叠加工况, 给材料强度、构件布置、热损控制与排凝效率带来复杂挑战。技术路径选择与设计策略制定必须针对这些典型问题展开有针对性部署。围绕石油化工装置蒸汽管道的材料应用、构造设计与运行控制等核心环节, 本文展开工程化研究。

1 石油化工工艺装置蒸汽管道概述

1.1 蒸汽管道工况特性

蒸汽管道在高温热工环境下持续运行, 承受较大温度梯度、压力波动与冷凝液影响。蒸汽介质在长距离输送过程中温度随管线布置、散热条件与工艺负荷发生动态变化, 形成显著热位移, 使管壁产生周期性应力响应。蒸汽内部常呈干湿交替状态, 气相段具有高焓特性, 液相段在局部低温区形成凝聚层, 气液界

面扰动加剧内壁冲刷^[3]。工况压力在启停、切换、升温过程中产生速率较高变化, 瞬态冲击使管道节点产生复杂载荷叠加。流速在干饱和蒸汽区保持较高水平, 在含液区域因流型转变出现湍动增强现象, 使壁面受到非均匀冲击载荷。运行环境在不同区域呈现散热条件差异, 部分敷设区域暴露于室外冷暖循环, 部分位于装置密集空间, 受设备辐射热源影响, 使蒸汽管线呈现温度场非均匀特征。

1.2 蒸汽管道失效模式

石油化工装置蒸汽管道在长期运行状态下易出现多类别失效形式, 载荷作用与介质特性共同构成失效主因。高温环境使材料产生蠕变现象, 壁厚在长期受力条件下出现缓慢伸长与强度下降, 引发高温区结构稳定性削弱。冷启停循环使金属组织受到频繁热疲劳作用, 焊缝位置与应力集中区域易形成微裂纹并逐步扩展。干湿交替环境使氧腐蚀速率加快, 局部温度降低位置易形成点蚀坑, 凝聚液滞留区内腐蚀深度增长速率显著高于干区。瞬态压力冲击易在含液区触发水击现象, 液柱冲击使弯头、三通与阀门连接位置产生极高局部应力, 加速结构损伤。流动扰动与设备振动

耦合作用使支架附近出现振动疲劳,固定端附近焊缝易发生裂纹扩展。环境因素在外敷设区域表现突出,金属外壁在雨水、湿气与温差作用下易出现外表面腐蚀,形成保护层剥离与壁厚衰减。

2 石油化工工艺装置蒸汽管道关键技术

2.1 蒸汽合金钢管材选用

蒸汽合金钢管材配置从高温结构稳定性入手,对管网各区段温域进行划分,再按介质状态、压力等级、热循环频率限定材质等级。高温主管段采用 Cr-Mo 系合金钢,通过控制合金含量、限制晶粒尺寸、稳定淬回火组织构成基础性能区间。制造阶段对轧制温区、冷却节奏、组织均匀性实施分批检验,使每批次管材形成可追踪性能记录。预制阶段管段端面采用机械切削方式处理坡口,避免产生热影响带组织粗化,并对端部硬度实施抽样测量。中温管段采用低合金钢,通过控制回火温区保持韧性,支线与伴生管段按不同蒸汽等级进行材质分级,使整套蒸汽管网在材料层面形成分区体系。

进入安装阶段后,对管段执行复核流程,通过光谱比对确定炉批一致性,并采集显微样片核对组织等级,使材料状态与设计对应。管段组对前设置标识区,对每根管材编号存档,使后续焊接、检验、巡检阶段具备可追踪性。

2.2 热补偿构件布置

蒸汽系统热补偿布置从结构走向规划切入,对管线热位移量进行分段划定,再按约束边界、空间条件、走向变化配置补偿节点。布置初始由固定点、导向点、滑动点构成基本框架,再在走向突变处增设转折段^[4]。图1所示折线结构在空间受限区域构成自然补偿位置,使热位移在多处折角中产生分散变形。补偿段间距按热位移量、支承刚度、管径比值设定,使变形路径可控。跨区段管线采用分层布置方式,使支架与补偿段之间形成分区响应关系。

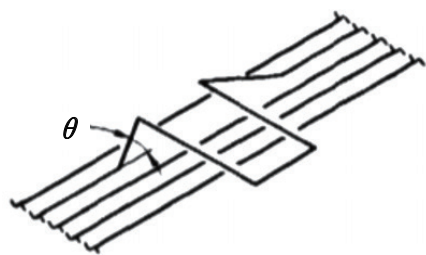


图1 蒸汽管道折线补偿结构

补偿构件安装按工序划分组织,先完成固定端标定,再按导向端位移方向组装滑动座,使管线位移在设定方向内运行。折线段角度按图示结构设定,在现场以实测距离校对折角位置,使角度偏差控制在允许区间。补偿段周围配置支承构件限制横向摆动,使管

线在热循环阶段保持可控轨迹。跨越结构位置对热位移形成独立计算单元,使跨平台区域的补偿段与平台变形量兼容。

2.3 保温隔热层热损控制

蒸汽管道保温隔热层构造由热面温区、散热条件、结构约束等因素共同决定,设计阶段按区域温度梯度划分保温厚度,再以材料等级构建多层叠合结构。图2展示的复合式保温结构由硬质保温瓦、反射层、泡沫填充层、外护层组成,可在长距离蒸汽管段形成稳定覆盖带。保温层厚度依据室外、室内、平台密集区三类条件分段确定,反射层对辐射热流形成周向隔断,保温瓦在高温区形成结构支撑。不同材料间采用错缝方式铺设,使各层之间贴合均匀,避免形成局部热短路。接口位置布置加强带,使保温系统在振动环境中维持紧固状态^[5]。

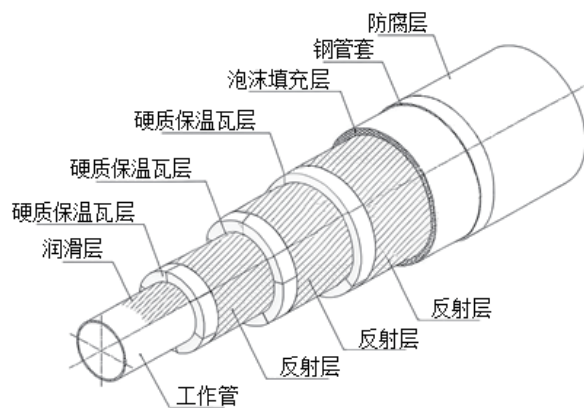


图2 蒸汽管道复合式保温构造示意

安装工序按照包覆顺序执行,先在管段表面设置润滑层,再放置保温瓦,使其沿环向形成闭合结构。反射层布置时采用搭接方式延伸覆盖,使结构在环向方向形成连续面。外护层由金属板卷制成型,并按现场空间切割开口,使直线段与弯头段均能形成贴合形态。

2.4 排凝管段水击消解

排凝管段布置从凝聚液迁移规律入手,将管线坡向设计为单向下降结构,使液体在重力作用下顺沿最低位置进入排凝点。排凝点设置在低点、换热器出口、支线并入主线位置,使液体易积聚区具备排放条件。排凝阀组采用分段配置方式,使每个区段形成独立排液单元。排凝点间距依据流速、管径、热负荷变化形成差异化布置。支线入口设置短距缓冲段,使液体进入主管时在可控混合区运行。换向点采用圆角结构,使液体转向阶段不形成直角冲击。

水击消解策略基于流型控制实施。含液区采用小尺寸泄液支线,使凝聚液在高流速区不形成厚液层。支线与主管交汇处采用斜插结构,使混合过程形成渐

表 1 技术测试结果

管道类型	高温主管	中温支线	设备接管	平均
温度偏差 /℃	3.27	4.19	3.74	3.73
热位移偏差 /mm	1.84	2.37	1.92	2.04
日均排凝次数 / 次	2.13	3.28	2.86	2.76
外护层紧固检点偏差 /mm	0.46	0.58	0.63	0.56
焊缝返修率 /%	2.28	3.41	2.97	2.89

变模式。关键转向段设置柔性支承，使瞬态冲击不会产生过大反力。长期冷偏运行区域设置辅助加热带，使液体不形成大面积冷凝区。平台密集段采用局部排液结构，使液体在狭窄区域仍能顺畅排出。

2.5 焊接接头缺陷检验

焊接接头检验方案从焊缝准备工作开始建立，坡口几何形态按管材等级与壁厚范围确定，端面采用机械切削方式处理，使坡口表面形成规则基面。预热温区按材质淬硬倾向设定，使焊接热循环在稳定范围内运行。焊接过程中控制层间温度、调节热输入、维持焊道轨迹平稳，使焊道金属在高温区形成细化组织。焊缝收弧位置采用分散式处理，使焊缝整体受力不形成单一集中点。焊接完成后执行去应力处理，使接头金属组织保持稳定。

焊接检验以外观检查、渗透检测、超声检测、射线检测构成主要流程。外观检查用于甄别咬边、裂纹、焊瘤等表面特征。渗透检测对焊缝表面微裂纹实施识别。超声检测用于内部缺陷定位，通过声束反射特性判定未熔合、夹渣、空洞等内部结构状态。射线检测形成内部结构影像，令缺陷形态与位置获得直观呈现。检验后对焊缝分级标定，并对不合格区域执行返修。

3 案例分析

3.1 案例概况

天津博迈科海洋工程有限公司在海洋平台能源模块建设过程中配置了一套中高压蒸汽系统，蒸汽等级覆盖 1.0MPa 至 2.5MPa，运行温区集中在 300℃至 450℃区间。蒸汽主管线长度较大，支线数量密集，空间布局受甲板结构、设备布置与海上环境限制，使蒸汽管网在高温循环、振动叠加、冷热交替条件下呈现明显结构响应。现场排查发现局部材质等级不统一、补偿段分布不均、保温层热损差异明显、排凝点分布不连续、焊缝检验记录不完整等情况，长期运行阶段易形成热位移不均、散热不稳、凝聚液累积、焊缝应力集中等典型现象。为使管网结构保持稳定运行状态，项目团队将前述技术路径在不同类型蒸汽管段中展开应用验证，以形成可推广设计与安装方法。

3.2 效果分析

表 1 是技术测试结果。温度偏差中，高温主管为

3.27℃、中温支线为 4.19℃、设备接管为 3.74℃，差值反映不同区段热通量条件与保温厚度设置关系。热位移偏差在 1.84mm 至 2.37mm 之间，高值集中于支线，源于折线段数量、节点间距、导向支架刚度变化，主管与接管因约束结构较稳定而形成较低偏差。排凝次数在 2.13 次至 3.28 次区间，支线记录值最高，与弯头数量、坡度调整、凝聚液迁移路径长度形成对应关系。外护层紧固检点偏差为 0.46mm 至 0.63mm，数据与保温瓦分段安装方式、外护板搭接形态、加强带间距及平台振动等级构成关联。焊缝返修率在 2.28% 至 3.41% 区间，中温支线记录值偏高，原因来自焊口密度大、姿态复杂、层间温区控制难度提升，主管因材质等级一致性与焊接参数控制精细度较高而呈现较低返修比例。

4 结语

蒸汽管网在结构配置、运行条件、介质特性共同作用下呈现多源耦合响应，关键技术部署需在材料分区、补偿构件布置、隔热构造分层、排凝系统组织、焊接检验等环节形成稳定体系。工程实践记录显示，差异化策略能够使管段在温度场、位移场、流型区段中保持可控状态，为后续装置建设与运行管理奠定技术基础。

参考文献：

[1] 秦文戈. 工程建设项目蒸汽管道内洁管理探讨 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2025, 42(02): 20-22.
[2] 戴康群. 石油化工工艺装置中蒸汽管道配管的设计 [J]. 化工管理, 2023(17): 114-116.
[3] 荆瑞静. 浅析中压蒸汽管道保温层厚度的设计计算 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(19): 100-102.
[4] 黄旭东, 王英霞, 徐征勇. 高温中压长输蒸汽管道的热补偿方式及支架约束 [J]. 工程建设与设计, 2024(9): 52-55.
[5] 曹凯, 鲍文龙, 赵坤, 等. 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.

作者简介：

刘亚萍（1987-），女，河北人，本科，中级职称，研究方向：工艺管道设计。