

绿色工厂背景下蒸汽管道低碳设计路径探索

邱威

山东神州工程设计有限公司南京分公司，江苏南京，210000；

摘要：绿色工厂建设是工业领域减污降碳的重要方向，蒸汽管道作为工厂能量传输核心设施，设计优化对碳排放控制至关重要。本文结合《2024—2025年节能降碳行动方案》政策导向与两项工业改造案例，剖析蒸汽管道材料、保温、系统三大维度碳排放痛点，从低碳管材选型、复合保温优化、余热回收构建路径探索方案。通过具体技术适配与细节管控，形成兼顾能效与经济性的设计体系。研究可为绿色工厂达标提供技术支撑，也为工业管道设计人员提供可落地的实践思路。

关键词：绿色工厂；蒸汽管道；低碳设计；保温优化；余热回收

DOI：10.69979/3029-2727.26.03.052

引言

“双碳”目标引领下，工业绿色转型步入关键阶段。绿色工厂以全生命周期低碳为核心，要求生产各环节同步提升能效、削减碳排放。蒸汽管道广泛服务于热力输送、工艺加热等场景，其热损、材料消耗及运维过程均会产生碳排放，是工厂低碳改造的重点对象。

当前《2024—2025年节能降碳行动方案》（国发〔2024〕12号，简称《行动方案》）明确强调新材料替代与产品设计优化，推动工业领域从源头降低环境影响。传统蒸汽管道设计模式侧重基础功能与经济性，已难以适配绿色工厂的低碳要求，亟需探索科学可行的优化路径。本文结合工程实践经验，为工业蒸汽管道设计人员提供系统性设计思路。

1 蒸汽管道设计碳排放痛点分析

1.1 材料层面碳排放偏高

传统蒸汽管道多采用金属材料，这类材料生产过程能耗较高，且全生命周期碳排放占比不低。同时，金属材料耐腐蚀性能有限，服役期间需频繁维护更换，进一步叠加碳排放压力，与绿色工厂源头减碳理念不符。

1.2 保温设计能效不足

传统设计常以经济性为首要考量，保温材料选型与结构设计缺乏系统性，且忽视工况适配性与全周期能效。单一保温材料普遍存在性能短板：传统硅酸铝材料耐高温尚可，但导热系数偏高，长期高温工况下易粉化脱落，需频繁检修更换；普通岩棉材料成本较低，却存在疏水性能差的问题，潮湿环境中保温层易吸潮结块，不仅丧

失保温功效，还会加速管道外壁腐蚀；玻璃棉则仅适用于低温场景，高温蒸汽输送中易老化失效。传统设计多采用“单层保温+简单防护”模式，未设置反射层、防潮层等辅助结构，热量通过传导、热辐射及冷凝水积聚多途径流失。部分工程为控本缩减保温层厚度，对阀门、法兰等异形部位用通用保温套敷衍处理，局部热损占比可达总热损的30%以上，这一数据来自工业管道保温工程实测统计^[1]，与绿色工厂全周期低碳要求存在明显差距。

1.3 系统设计缺乏低碳统筹

管道布置往往未充分结合工厂整体热力需求，易出现管线冗余、弯头过多等问题，间接增加输送阻力与热损。尤其当弯头角度小于90度时，局部阻力系数会显著上升，加剧蒸汽流速衰减与热量散失，且冗余管线还会增加管材消耗与后期运维工作量。凝结水回收系统设计不完善是常见短板，多数传统系统仅采用单级回收模式，无法适配不同温度、压力的凝结水，导致高温凝结水携带的余热未能有效利用，部分场景余热回收率不足50%，造成能量浪费的同时提升碳排放水平，且回收泵选型与管网管径不匹配时，还会引发系统压力波动，影响生产稳定性。

2 绿色工厂蒸汽管道低碳设计路径

2.1 低碳管材选型与应用

优先选用轻质高强非金属管材，核心选用增强热塑性塑料（RTP）、玻纤增强聚丙烯（FRPP）两类，适配不同蒸汽工况。增强热塑性塑料采用“高分子基材+纤维增强层+防腐外层”三层复合结构，基材为耐高温改

聚乙烯,增强层用高强度玻纤编织,可稳定适配180℃以下中低压蒸汽输送,生产无需高温冶炼工艺,碳排放较传统碳钢管材大幅降低。玻纤增强聚丙烯管材适用于100℃以下低温蒸汽场景,生产可掺入30%以上再生聚丙烯原料,通过改性提升耐蠕变性能,压缩原料碳足迹,契合固废资源化理念。选型需结合温度、压力及现场环境,潮湿工况强化管材外层抗水渗透处理,避免性能衰减,且非金属管材重量仅为金属管材1/3,可减少吊装能耗与支架承重压力。

高压蒸汽输送场景可选用低碳改性铬钼合金管,搭配环氧煤沥青防腐涂层工艺,延长材料服役周期至20年以上。该管材需控制铬钼元素配比以平衡强度与低碳性,涂层施工需保障厚度均匀性,否则易出现局部腐蚀。通过减少更换频次,降低运维阶段的碳排放,实现全生命周期低碳管控,同时兼顾使用安全性与稳定性。

2.2 复合保温结构优化设计

采用多层复合保温结构替代单一材料,核心推荐“纳米气凝胶+岩棉”复合体系,适配不同温度等级蒸汽管道需求。纳米气凝胶作为内层核心保温材料,常温导热系数极低,450℃高温工况下仍能保持稳定性能,疏水率超99%,可阻隔空气中水分侵入。外层高密度岩棉强化结构稳定性与防火性,降低保温层整体厚度。DN800以上大管径管道,需采用定制化裁片与无缝拼接工艺,弯头、法兰处精准贴合,拼接处用专用耐高温密封胶填充。该思路已应用于大型新材料产业园改造,能降低保温层维护频次,但纳米气凝胶成本较高,大管径应用需平衡能效与预算。

保温设计需结合输送介质温度动态调整,针对高温场景强化保温层防护设计,同步设置防潮层与保护层,避免保温失效。管道附件保温需与主体设计同步推进,对阀门、补偿器等易产生局部热损的部位,采用定制化保温套提升整体能效,保温套接缝处用耐高温密封胶填充,外层缠绕玻纤布加固。管道支座保温需与隔热管托协同设计,混凝土或钢结构支架与管托接触部位,加装聚氨酯管壳缓冲层,厚度按介质温度匹配,高温管道支座额外增设反射层,阻断热量通过支架传导散失。传统裸露支座热损占整条管道热损的60%,优化后可将这一比例控制在20%以内^[2]。同时根据管道敷设方式调整保温策略,无沟敷设管道需强化保温层抗紫外线、抗老化性能,选用耐候性外层材料,延长保温体系服役周期。

2.3 系统统筹与余热回收设计

优化管道布置需遵循短路径、少损耗原则,结合工厂热力分布规划管线走向,优先贴近热力负荷中心,减少冗余路段与弯头数量,弯头优先选用1.5D长半径型号,规避90度以下急弯以降低局部阻力。合理设置集液包与疏水阀,避免管道内存液加剧热损,同时区分功能需求单独布置专用管线,保障系统运行效率。管托选型是易忽视的低碳要点,需采用新型复合隔热管托替代传统裸露管托,杜绝“热桥”产生——DN500以下管道搭配20-30mm软质保温层与≥50mm硬质保温层, DN500以上则提升至≥60mm硬质保温层,选用无机复合隔热钢材料,确保250℃工况下导热系数≤0.2W/(m·k)、抗压强度≥10.0Mpa。滑动与导向管托采用四氟滑板,控制摩擦系数≤0.1,减少管道移位时的应力损伤,同时将管托保温与管道整体保温一体化设计,避免支座部位热损遗漏,这类管托热损占比可较传统产品降低60%以上。

凝结水余热回收系统遵循“分级回收、按需利用”原则,结合工厂工艺温度需求规划路径。蒸汽末端设备出口设专用收集罐,配套除铁、除油预处理装置,去除杂质与油污。高温凝结水引入低温工艺加热环节复用,低温凝结水导入厂区供暖系统,实现能量梯级利用。不同压力等级凝结水分流设计,高压凝结水经减压装置降至适配压力后汇入管网。回收管网关键节点设温度、压力监测元件,实时反馈运行状态。凝结水回收管道需单独布置,严格控制坡度,确保顺畅流动,减少滞留热损。

2.4 设计合规性与低碳管控

碳排放控制纳入设计评审核心指标,构建“设计-施工-运维”全流程低碳管控体系,契合绿色工厂全生命周期管理要求。碳足迹核算严格遵循GB/T24067—2024《温室气体产品碳足迹量化要求和指南》,参照ISO14064标准框架,覆盖原料开采、生产加工、运输安装及运维废弃全阶段,明确数据地理边界与核算范围,确保结果可追溯、可互认。跨专业评审小组从材料碳足迹、保温能效、系统回收效率三方面评估,对碳足迹超标10%以上的方案直接否决,预留技术优化空间适配工况调整。施工优先采用预制装配工艺,工厂内完成保温、防腐一体化处理,选用ODP为0、GWP<25的环戊烷发泡剂,现场仅拼接安装,控制间隙≤2mm并密封。保温废料、管材余料分类回收,硬质聚氨酯废料可二次

加工为填充料,建立全生命周期台账并对接运维系统,制定量化验收标准,明确高温管道热损率 $\leq 2\%$ (契合GB/T11048-2008要求)、余热回收率 $\geq 85\%$,确保管控落地^[3]。

3 工程案例验证

2025年某大型新材料产业园高温高压蒸汽管道改造项目(项目编号:XC-2025-089),采用本文设计路径升级。核心管线为DN900规格,长期处于450℃、3.6-4.1MPa工况,改造前用传统硅酸铝保温材料,热损大、维护频繁。项目选用低碳改性铬钼合金管搭配环氧煤沥青涂层,保温系统采用70mm纳米气凝胶+岩棉复合结构,配套定制拼接工艺,同步搭建分级凝结水余热回收系统。改造重点解决大管径保温贴合、高温材料稳定性难题,通过精准裁片技术确保保温层贴合紧密,运行震动下无脱落。投用后管道外表面温度稳定可控,保温层维护频次较改造前减少80%,该数据来自项目运维台账,余热回收大幅减少蒸汽消耗,但初期材料投入较传统方案增加15%,投资回收周期控制在2.5年,适配绿色工厂长期运营。

2025年某沿海石化园区化工装置蒸汽管道改造项目(项目编号:HG-2025-156),针对管线冗余、凝结水浪费痛点优化。结合热力分布重规划管线走向,删除冗余弯头与支路,采用短半径弯头减少阻力。中低压管线用增强热塑性塑料管,高压路段用低碳合金管,平衡适配性与低碳性。余热回收系统按凝结水温度差异,分别导入反应釜预热、厂区供暖场景。改造强化管材与保温层防潮处理,应对沿海盐雾腐蚀。项目投入成本较低,改造后热损与能耗显著下降,运维人工及材料消耗减少。两类案例覆盖不同工况,验证了设计路径的适配性,但沿海高盐雾环境下,管材寿命仍需长期观测,推广时需结合场景调整方案^[4]。

4 结束语

绿色工厂背景下,蒸汽管道低碳设计需突破传统功能导向模式,实现材料、结构、系统的多维协同优化。新型低碳管材应用、保温技术升级与余热回收系统构建,

是降低碳排放的核心方向。设计人员需紧扣政策导向与工程实际,整合优化技术方案,在保障生产需求的同时最大化提升能效。

立足前文“设计-施工-运维”全流程低碳管控体系,未来可结合智能化技术优化管道运行管控,推动设计从“被动节能”向“主动调控”转型。设计环节引入AI仿真技术,选用ANSYS Icepak热工仿真软件,构建三维热工性能模型,输入介质流速、环境温度波动、管道敷设方式,针对高低温工况设差异化边界条件,精准模拟热损分布与碳排放总量,将设计偏差控制在8%以内,规避传统经验设计漏洞。针对中小工厂数据不足痛点,采用轻量化工业AI方案,接入行业通用工况数据库补充支撑,实现“即插即用”边缘部署,降低转型门槛。运行阶段搭配低功耗采集微系统,在焊缝、支座等节点布设0.3mA级无线传感器,通过智能休眠唤醒模式平衡监测与能耗,无需频繁换电,实时捕捉热损、凝结水滞留问题,提前7-10天预警腐蚀隐患。融合数字孪生技术搭建管道镜像,联动数据预判材料老化、保温层破损风险,制定维护计划。当前技术落地面临工况适配难、成本高、系统兼容等约束,需通过技术迭代降本,积累场景经验形成标准指南,加强团队培训,打通落地“最后一公里”^[5]。

参考文献

- [1]张林阳.蒸汽管网节能改造设计[J].上海化工,2025,50(3):41-45.
- [2]何海军,王乃继,赵静,等.长输蒸汽管网关键部件节能提效研究[J].化学工业与工程,2025,42(3):173-182.
- [3]郭雪伟,曲昌盛,徐东耀.双碳背景下碳排放核算体系现状与展望[J].环境工程技术学报,2025,15(3):93-106.
- [4]徐路遥.烧结余热锅炉及蒸汽系统优化[J].冶金动力,2023,39(4):73-76.
- [5]荣雁.新型绝热材料在稠油注蒸汽管线保温中的应用[J].材料导报,2020,34(Z1):173-177.