

化工管道保温结构优化与节能效果分析

张雅君

内蒙古包钢庆华煤化工有限公司 内蒙古自治区 巴彦淖尔 乌拉特前旗 014010

【摘要】：化工管道长期处在温差、振动、雨水与腐蚀介质共同作用下，保温效果不只取决于材料导热系数，还受层次组合、防潮密封、管件热桥和外护完整性影响。针对主保温层选材、厚度校核、水分防护和节点断热提出改进方法，并以单位长度散热、表面温度分布、运行波动和寿命周期费用评价节能效果。评价需统一介质温度、环境条件、运行时间和取样位置，才能区分材料性能改善与结构缺陷修复的实际贡献。

【关键词】：化工管道；保温结构；散热损失；节能效果

DOI:10.12417/3041-0630.26.10.001

引言

高温介质在厂区管网中输送时，散热损失会增加热源侧负荷，低温介质则可能因外界得热改变工艺状态。旧保温层受潮、接缝开裂、金属外护板松动和支承件直通传热，会使设计厚度与在役热阻出现明显偏离。结构改造需先识别热量通道，再将材料、厚度、防潮层和节点密封编入同一施工顺序，并用可对照的测温与能量记录检验改造后的运行反应。

1 化工管道保温结构优化策略分析

1.1 保温材料选用与层次改进

保温材料的选择应从介质常用温度、短时峰值、管径、户外暴露程度和检修条件入手。岩棉、硅酸铝和气凝胶毡的导热、吸水、抗压与施工特性不同，不能只用常温导热系数排序。材料选用需核对使用温度区间、热稳定性和疏水性^[1]。管线存在周期启停时，内层还要能够承受热胀冷缩引起的径向位移，外层则要限制风载和局部碰击。可将主保温层分成两层错缝铺设，环向接缝错开，纵向缝避开管道下方积水区；遇到法兰、阀门或异径件时，先按几何形状分块放样，再用可拆卸外壳封闭。层间不得留有直通缝，否则高性能材料也会因对流空腔和潮气迁移失去应有热阻。

1.2 保温厚度校核与成本控制

保温厚度校核应以圆筒壁导热、内外表面换热和接缝附加热阻为计算边界。已知管壁外径 d_1 、保温后外径 d_2 、材料导热系数 λ 和内外温差时，单位长度导热热阻可按 $\ln(d_2/d_1)/(2\pi\lambda)$ 表示，然后叠加外表面对流与辐射热阻。蒸汽管道的结构设计还需核对敷设方式、湿环境和支架布置^[2]。厚度增加到一定范围后，新增材料、外护与施工费用会继续增长，单位厚度带来的热损降低却逐步减小。因此，应对若干厚度方案使用同一介质温度、环境温度、年运行时间和能源单价计算，将年散热费用与年折算投资相加。对启停频繁或介质温度波动较大的管

线，要分工况计算时长，不用全年满负荷代替实际运行。

1.3 防潮防水结构与渗水控制

水分进入保温层后会填充孔隙、改变传热路径，并可在金属管壁外侧形成长时间潮湿界面。防潮层应连续包覆主保温层，纵向与环向搭接接口朝向低风压一侧，外护板咬口和铆钉孔位使用耐温密封材料处理。户外管线的弯头、三通、法兰上方和竖管下端是雨水较易滞留的位置，外护板排水方向应与重力流向一致。施工中可将搭接尺寸、密封连续长度和紧固点间距列入隐蔽检查，每完成一段即检查纵缝、穿透件和排水边。在役结构发现表面低温异常、外护鼓包或锈水痕迹时，不宜只在外部打胶，要局部拆开后检查含水与管壁腐蚀，更换受潮材料再恢复封闭层。

1.4 管件接口和承重节点联合控制

阀门、法兰、异径接头、吊架和导向座会打断连续保温层，金属件跨越热阻后便成为局部散热通道。节点处理应先记录几何尺寸和拆装空间，根据管件轮廓切割保温块，将拼缝控制在在外护壳覆盖范围内。气凝胶毡可在空间受限、外表面温度要求较严的管件处减小结构厚度^[3]。该材料仍需与防潮层、固定件和可拆卸外壳配合，不应把材料替换当成节点处理的全部。法兰盒与阀门盒可采用分半式结构，内衬可更换保温块，交界缝外加耐温密封带。支架位置宜设承压隔热块，其抗压强度与设计载荷校核，避免主保温材料被压缩后形成薄弱带。验收时在直管、弯头、法兰和支架周边分组布点，如果节点温差在相似工况下持续扩大，要回查拼缝、固定件和隔热块。

2 化工管道保温结构改造

保温结构改造按“热异常定位-局部拆检-管壁处理-分层恢复-运行复测”的顺序执行。停车前先在稳定工况下记录介质入口与出口温度、环境温度和外表面温度场，将弯头、阀组、支架及外护损伤处单独编号。拆检后区分材料粉化、受潮、压缩

和接缝贯通四类状态，管壁存在锈蚀时先完成表面处理与厚度复核，未确认基底状态不得封闭。恢复时先装主保温层，再做隔气防潮层和金属外护层，管件节点改用可拆卸保温盒，支承部位用承压隔热块断开金属直通路径。每一层的接缝、搭接、紧固和密封留存隐蔽检查记录，外护封闭后再进行外观与红外测温。图中五个结构层次用于核对安装顺序和水分阻隔路径。

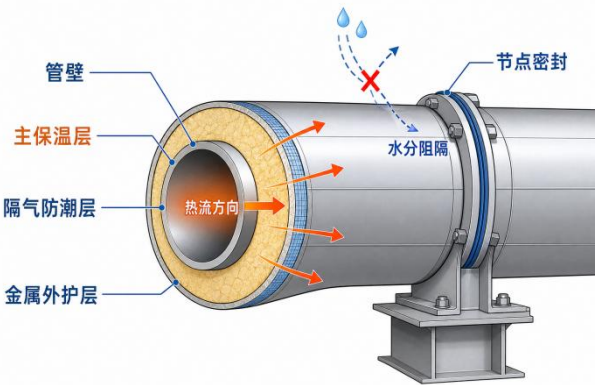


图1 化工管道保温结构剖面示意

3 优化后节能效果对比

3.1 单位长度散热损失对比

单位长度散热损失的对比必须统一介质温度、环境温度、风速、运行时长和管段长度。改造前后可在相近负荷区间各选一个稳定时间窗口，用入口、出口的温度与压力换算介质焓差，再按质量流量折算管段热损。实验与仿真联合方法可用于比对不同材料和层次的散热特征^[4]。现场取样还要排除阀门操作、疏水、放空和仪表校准造成的短时波动，否则焓差变化可能并非保温结构所致。表中六类工况只给出评价取样的建议参数，不代替实际管径、运行制度和仪表精度校核。工况代码 1-6 只用于区分取样组，所有数值均为工程设定值。

表1 节能效果对比取样参数建议（工程设定值）

工况代码	管径/mm	基线/h	测点/个	间隔/min	复核/次
1	100.000	24	6	10	3
2	150.000	24	8	10	3
3	200.000	36	8	15	4

参考文献：

[1] 姜万军,牛存厚,张冰冰,等.石油化工管道保温材料选用[J].炼油技术与工程,2024,54(11):39-41.
[2] 曾鑫.长输直埋蒸汽管道保温结构设计及优化分析[J].区域供热,2025(6):141-148.
[3] 李洪宝,马欣.气凝胶绝热毡在化工管道或设备中的应用分析[J].化工设计通讯,2024,50(5):64-66.
[4] 何海军,王乃继.基于实验与仿真的最优蒸汽管网保温结构确定[J].化工进展,2024,43(7):4164-4172.

4	250.000	36	10	15	4
5	300.000	48	10	20	5
6	400.000	48	12	20	5

3.2 管线表面温度与运行稳定性对比

外表面温度场可用来定位局部热桥、受潮区和保温缺口，但单个测点的温度不能直接代表整段管线节能量。改造前后应使用同一台仪器、同一发射率设置和相近观测距离，沿管道环向选取上、下、左、右位置，纵向覆盖直管、弯头、法兰、阀门和支架。温度图上出现条带状高温区时，优先检查纵向接缝与外护搭接；出现环状高温区时，回查环缝错开和紧固状态；节点温度持续偏高则拆检隔热块或可拆卸保温盒。运行稳定性还可通过同负荷下出口温度波动、热源补偿频次和异常点重复出现情况判断。连续多个取样窗口中温度分布趋于平稳、局部异常不再扩展，才可认为节点处理达到预期。

3.3 寿命周期成本效益分析

寿命周期费用应合并计算材料、施工、停车配合、年散热、日常巡检、局部修复和到期更换。气凝胶毡等材料的初投资较高，若只比较每立方米价格，容易忽略其减小结构厚度、降低外护用量或延长修复周期的可能性。普通保温材料的初费用较低，但户外潮湿管区若缺少连续防潮层，受潮后的能耗与重复拆修会累积。计算时可按相同评价年限将各年费用折算到基准时点，能源价格、运行时间和维修周期分设低、中、高情景，观察方案排序是否改变。如果某方案只在高能价或过长运行时间下才显示费用优势，就要将该适用边界写入选型记录。结构方案的经济性不应与安全隔热、防烫和防腐要求相互抵消，必须在技术边界满足后比较总费用。

4 结语

化工管道保温结构优化需将材料热性能、厚度的边际收益、水分阻隔和节点热桥纳入同一改造链。直管层次完整而阀门、法兰或支架处理粗放时，局部散热仍会削弱整段管线的节能表现。改造效果应在工况可比的条件下，以单位长度热损、表面温度场、出口波动和寿命周期费用共同判定。检测记录与隐蔽施工记录按管段编号对应，可在热异常重复出现时追溯到具体层次和节点。