

低温储罐绝热层厚度优化降低能量损耗研究

梁存化 (中石化南京工程有限公司, 江苏 南京 210049)

摘要: 本文聚焦低温储罐绝热层厚度优化对能量损耗的控制作用, 系统梳理绝热层基础特性、优化影响因素及技术路径三大核心维度, 为低温储罐高效运行提供理论支撑。研究表明, 绝热层材料类型、结构空间差异、施工完整性构成能量损耗关联的基础, 而环境条件、运行工况、成本平衡是厚度优化的关键约束, 通过环境动态适配、工况耦合优化、全周期成本导向的技术路径, 可实现厚度与能耗的精准匹配。该研究为解决低温储罐“节能-成本”平衡难题提供思路, 助力工业低温存储系统的经济性与高效性提升。

关键词: 低温储罐; 绝热层; 厚度优化; 能量损耗

中图分类号: TE89 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 005-0162-03

Study on thermal insulation layer thickness optimization of cryogenic tank to reduce energy loss

Liang Cunhua (Sinopec Nanjing Engineering Co., LTD., Nanjing Jiangsu 210049, China)

Abstract: This study investigates the energy loss control through thickness optimization of insulation layers in cryogenic storage tanks. It systematically examines three core dimensions: fundamental properties of insulation layers, influencing factors for optimization, and technical approaches, providing theoretical support for efficient operation of cryogenic storage systems. The research demonstrates that insulation material types, structural spatial variations, and construction integrity form the foundation for energy loss correlation. Environmental conditions, operational parameters, and cost-benefit analysis serve as critical constraints for thickness optimization. Through dynamic environmental adaptation, coupled operational optimization, and full-cycle cost-oriented strategies, precise alignment between insulation thickness and energy consumption can be achieved.

Key words: low temperature storage tank; insulation layer; thickness optimization; energy loss

低温储罐作为能源、化工及医药领域存储低温介质的核心设备, 其能量损耗主要源于绝热层冷量泄漏, 而绝热层厚度设计存在显著矛盾, 过厚增加制造成本和占地空间, 过薄加剧冷量流失和能耗飙升。当前, 低温存储需求持续增长, 厚度优化成为降低能耗的核心议题。

1 低温储罐绝热层的基础特性与能量损耗关联

1.1 绝热材料类型

绝热材料的本质特性直接决定低温储罐热量传递的效率, 进而与能量损耗形成强关联, 且这种关联需通过厚度设计来平衡。常见的真空粉末绝热、真空多层绝热与复合绝热结构, 在导热系数、结构稳定性及阻隔性能上存在显著差异: 真空多层绝热依托多层薄膜叠加形成的阻隔结构, 可大幅削弱空气对流与辐射换热, 其热量传递阻力远高于传统泡沫类材料, 相同能量损耗控制目标下, 所需厚度远小于真空粉末绝热; 而复合绝热结构则通过材料互补, 兼顾低成本优势与高效绝热性能, 但其厚度设计需匹配两种材料的导热性能、界面贴合度, 若材料衔接不当, 易形成局部热量渗透通道, 加剧能量损耗——简言之, 材料类型决定热量传递的基础阻力, 而厚度则是弥补材料性能短板、控制损耗的关键手段。

1.2 储罐结构空间差异

低温储罐的空间结构差异导致各部位热量输入强度不同, 进而使绝热层厚度与能量损耗的关联呈现局部化特征。罐顶作为开放暴露面, 直接承受环境温度波动、太阳辐射、雨水侵蚀, 热量输入强度是罐壁的 1.5-2 倍, 需通过加厚绝热层或复合结构设计减少损耗; 罐壁虽受环境影响较小, 但存在拼接缝热桥、风致对流强化问题, 厚度设计需配合密封工艺, 避免缝隙导致的局部损耗; 罐底因与地面接触, 受土壤温度梯度、地面热传导双重作用, 若厚度均匀化设计, 易导致罐底边缘损耗加剧, 需结合架空基础或保温垫层调整厚度分布, 确保各结构部位热量输入与绝热厚度适配^[1]。如下图 1 所示, 为低温储罐绝热层结构示意图。

1.3 施工完整性与厚度协同

绝热层的施工完整性并非独立于厚度的参数, 而是与厚度协同影响能量损耗的重要特性, 若厚度设计合理但施工存在缺陷, 会直接抵消厚度优化的节能效果。施工中常见的缝隙残留、拼接不严、材料密实度不足, 会形成热桥效应: 即使局部厚度达标, 热量仍会通过缺陷部位快速渗入罐内, 导致整体能量损耗上升。例如, 现场发泡工艺若密实度不足, 或预制模块

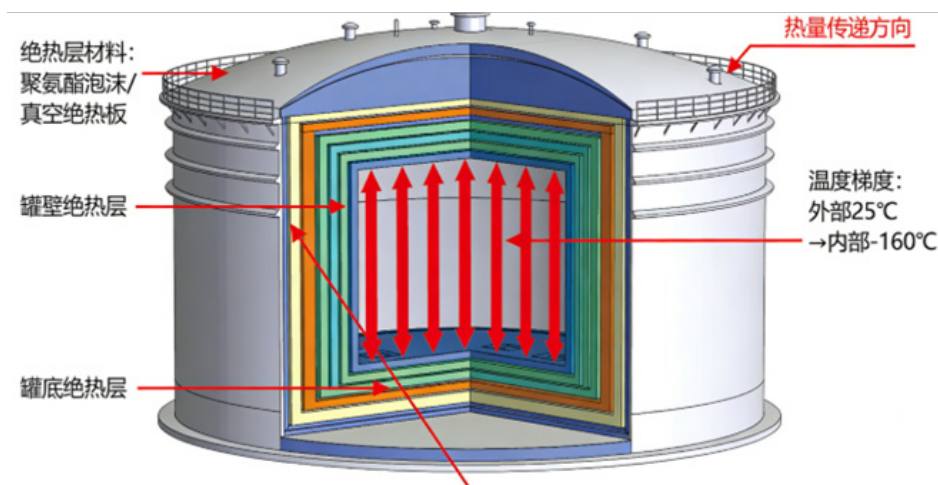


图1 低温储罐绝热层结构示意图

拼接未做好密封,会使局部绝热层的实际阻隔性能下降,此时即便按理论计算确定厚度,仍无法控制损耗^[2]。因此,厚度优化需同步匹配施工工艺规范性,通过现场发泡的压力控制、拼接处的密封胶填充,实现厚度设计合理性与施工完整性的协同,避免能量损耗因施工缺陷被放大。

2 低温储罐绝热层厚度优化的核心影响因素

2.1 环境条件

环境条件是决定绝热层厚度的外部前提,其动态变化直接影响热量输入强度,进而左右厚度设计。核心影响项包括环境温度波动、湿度渗透与风速强化的对流换热:高温环境下,罐内外温差扩大,需增加厚度阻断热量渗入;高湿环境(如南方沿海地区)易导致绝热材料吸湿,使其导热系数上升、绝热性能衰减,需通过加厚或增设防潮层减少水汽侵入;风速则会加剧储罐表面的强制对流,提升热交换速率,需根据区域常年风速调整厚度,避免因对流强化导致能量损耗超标^[3]。这些环境参数的组合差异,共同构成了厚度优化的基础约束边界。

2.2 运行工况

储罐的运行工况决定了绝热层厚度的内部适配性,核心关联参数为介质温度梯度、运行压力波动与充装率变化。存储介质温度越低,罐内外温差越大,热量渗透风险越高,需对应增加厚度以强化阻隔;运行压力波动会影响介质蒸发速率,压力过高时需通过加厚绝热层降低蒸发量,平衡压力控制与能耗;充装率过低则罐内气相空间扩大,气体对流换热加剧,需针对性加厚罐顶绝热层,减少气相区域的热量输入^[4]。工况参数的动态变化,要求厚度设计具备工况适配性。

2.3 成本平衡

成本平衡是厚度优化的经济红线,需统筹材料采

购成本、施工安装成本与长期运维成本的关系。高效绝热材料(如真空多层材料)单价高,但可通过减薄厚度降低总材料用量;施工成本与厚度正相关,过厚会增加现场作业难度与工时成本;运维成本则与厚度负相关——合理加厚可减少介质补充频率与能耗支出,但需计算初始成本增加与运维节省的平衡点,避免过度追求厚绝热层导致前期投入过高,或厚度不足引发长期运维成本飙升^[5]。

成本因素的约束,使厚度优化

需在节能效果与经济可行间找到最优区间。

3 低温储罐绝热层厚度优化的技术路径

3.1 环境动态适配的厚度设计

该技术路径聚焦环境条件这一外部约束,通过动态响应、分区适配实现厚度优化,核心是让绝热层厚度与环境参数的变化特征精准匹配。需引入环境参数实时监测系统,如湿度传感器、风速监测仪、温度记录仪,实时采集储罐所在区域的温度波动幅度、湿度变化频率、风速峰值区间,并将数据传输至控制终端,为厚度调整提供依据。例如,在高温高湿季节,当监测到湿度超过60%、温度高于30℃时,可通过临时增厚模块对罐顶、罐壁局部进行补充加厚,避免水汽渗透导致绝热性能衰减;在高风速时段,如台风季,则需在绝热层外侧增设抗风防护层,如金属薄板或高强度树脂板,减少风致对流对热量交换的强化作用,此时可适当降低主绝热层厚度,平衡抗风需求与成本控制^[6]。

基于环境对储罐不同部位的影响差异,推行分区绝热厚度设计:罐顶作为环境影响重灾区,直接承受太阳辐射、雨水冲刷,需采用复合绝热结构、加厚设计(如外层50mm耐候性泡沫塑料+内层100mm气凝胶毡),同时在顶部设置遮阳挡板,如浅色金属挡板,减少辐射热量输入;罐壁受风速与侧风影响较大,需根据储罐朝向调整厚度,迎风面可比背风面增厚20%~30%,并在外侧粘贴防风密封条,如丁基橡胶条,避免气流从拼接缝渗入;罐底因与地面接触,受土壤温度梯度影响,需在基础层增设保温垫层,如挤塑聚苯板,同时将罐底边缘厚度比中心区域增厚15%左右,阻断地面热传导的集中渗透^[7]。这种分区设计既避免了整体厚绝热导致的成本浪费,又针对性解决了环境对不同部位的差异化影响。

3.2 工况耦合的精准优化

此路径围绕运行工况这一内部需求,通过参数耦合分析、结构适配优化厚度,确保绝热层与介质特性、运行状态高度契合。核心是先明确储罐的核心工况参数组合,即介质温度等级(如深冷 -200°C 以下、常规低温 -100°C 至 -200°C)、运行压力波动范围(如稳定压力 $\pm 5\text{kPa}$ 、波动压力 $\pm 15\text{kPa}$)、充装率变化区间(如常年满充装80%以上、间歇充装40%~80%),再基于这些参数的耦合关系设计厚度。例如,存储深冷介质时,因罐内外温差极大,需采用高效绝热材料、增厚设计,优先选择真空多层绝热结构,其厚度设计需配合真空度维持系统,如内置吸附剂减少残余气体,避免真空度下降导致绝热失效;若介质为常规低温,如液氮、液氧,则可选用复合泡沫绝热材料,如泡沫玻璃、聚氨酯泡沫,厚度可适当减薄,同时在材料拼接处注入绝热密封胶,如硅酮绝热胶,防止局部热桥形成^[8]。

针对运行压力波动较大的储罐,如LNG储罐因蒸发气导致压力变化,需在绝热层中增设弹性缓冲层,如可压缩的气凝胶毡夹层,其厚度需根据压力波动幅度调整,波动幅度越大,缓冲层厚度需增加,以吸收压力变化对绝热层结构的冲击,避免因结构变形产生缝隙;对于充装率间歇变化的储罐,如医药冷链用液氮储罐,当充装率低于50%时,罐内气相空间扩大,气体对流换热加剧,需针对性优化罐顶绝热厚度,采用梯度增厚设计,从罐顶中心向边缘逐步增厚,边缘厚度比中心高30%,同时在气相空间内侧粘贴辐射反射膜,如铝塑反射膜,减少辐射换热。此外,还可通过“热场-流场耦合模拟”技术,模拟不同工况组合下的热量渗透路径,进而反向修正厚度设计,确保优化结果的精准性。

3.3 全周期成本导向的厚度选型

该路径以成本平衡为核心,通过全周期成本测算、性价比分析确定最优厚度,避免单纯追求节能或低成本导致的决策偏差。明确全周期成本构成,包括绝热材料采购成本、现场施工成本、长期运维成本,三者与厚度形成复杂关联:材料成本方面,高效绝热材料单价较高,但可通过减薄厚度降低总用量,需对比高价高效薄材与低价常规厚材的总材料支出;施工成本与厚度呈正相关,过厚会增加现场切割、拼接的工时与难度,可通过预制模块化设计减少现场施工量,此时需计算预制成本增加与现场工时节省的抵消关系,避免厚度优化导致施工成本飙升。

运维成本是全周期成本的关键变量,合理加厚绝热层可显著降低运维支出。例如,加厚后介质蒸发速

率下降,减少介质补充成本,如LNG储罐每年减少的介质采购费用,同时降低蒸发气处理成本,如减少燃烧或回收系统的运行能耗;但需注意,过度加厚会导致初始投入过高,需通过成本回收周期测算确定平衡点:若加厚后每年运维节省金额为A,初始成本增加金额为B,则回收周期 $=B/A$,当回收周期小于储罐设计使用寿命(通常15~20年)时,加厚方案具备经济性。此外,还需考虑残值成本,即储罐报废后绝热材料的回收或处置费用,优先选择可回收材料,如玻璃纤维类绝热材料,即使厚度稍厚,也可通过残值抵扣部分成本。通过这种全周期成本的综合测算,可在节能效果与经济可行间找到厚度最优值,避免单一维度决策的局限性。

4 结语

通过分析低温储罐绝热层的“基础特性-能量损耗”关联,明确环境、工况、成本三大优化约束,提出针对性技术路径:材料类型决定热量传递基础阻力,结构差异与施工完整性需配合厚度协同控耗;环境动态适配与工况耦合优化可实现厚度精准设计,全周期成本测算能划定经济可行区间。该研究为低温储罐绝热层厚度优化提供系统逻辑,未来需进一步强化智能化监测和多因素耦合算法的融合,推动技术向绿色化、高效化升级,助力工业低温存储的节能降耗。

参考文献:

- [1] 齐国庆,辛培刚,李祥民,等. LNG工艺罐体保冷绝热结构及绝热层厚度验算[J]. 石油和化工设备,2020,23(12):78-80.
- [2] 张俊锋,杨敏,朱天翠,等. -196°C 超低温绝热树脂基复合材料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料,2024,52(z2):88-91,103.
- [3] 张卫义,李星波,姚欣,等. LNG卧式储罐拉带式支撑应力分析及结构优化[J]. 压力容器,2022,39(8):40-49.
- [4] 席蓉,陈叔平,余铁浩,等. 低温球罐绝热层对管道结构强度影响的研究[J]. 煤气与热力,2024,44(2):后插10-后插17.
- [5] 余家愿,周文杰,徐佳琦,等. 低温储罐用多层绝热材料绝热性能优化[J]. 真空与低温,2024,30(6):712-718.
- [6] 许张良,谭宏博,吴昊. 车载液氢储罐蒸气冷屏组合绝热结构非稳态传热特性研究[J]. 低温工程,2025(2):26-33.
- [7] 邱国毅,高荣,司标,等. 低温储罐大流量回液冲击液面过程的数值模拟研究[J]. 低温工程,2022,(03):37-45.
- [8] 丁昌,孙浩,王群龙,等. 立式低温储罐真空性能研究[J]. 低温与超导,2023,51(10):75-80.