

超低温管道真空绝热技术研究

张彪¹ 郭艳波²

1 山西新唐工程设计股份有限公司宁波分公司

2 福建中沙石化有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i8.21633

[摘要] 若以氢能或液化天然气为代表的清洁能源产业得到迅速发展,超低温介质的远距离、低损耗输送就属于能源储运中的核心难题。真空绝热所依赖的极小传热系数及良好隔热效果是超低温管道中目前最可行的绝热方案。文中将按传热原理、构造改进、工艺现实和性能相关因素四项内容来归纳有关超低温管道真空绝热的理论及技术思路。基于辐射—传导结合的热力学模型考察变密度多层绝热的传热现象,就支撑件、端部热桥及真空夹层做优化分析,提出真空形成和保持的基本工艺,对操作变量、真空状态及材料特性与绝热的关系作归纳说明。所涉研究可作为优化设计真空绝热管道的理论基础,对减少输能损耗、促进清洁能源应用有较大的现实意义。

[关键词] 超低温管道; 真空绝热; 多层绝热; 传热机理; 真空维持
中图分类号: TB35 **文献标识码:** A

Research on Vacuum Insulation Technology for Ultra-Low Temperature Pipelines

Biao Zhang¹ Yanbo Guo²

1 Ningbo Branch of Shanxi Xintang Engineering Design Co., Ltd

2 Fujian Zhongsha Petrochemical Co., Ltd

[Abstract] If the clean energy industry represented by hydrogen or liquefied natural gas develops rapidly, the long-distance and low loss transportation of ultra-low temperature media is the core challenge in energy storage and transportation. The minimal heat transfer coefficient and good insulation effect relied upon by vacuum insulation are currently the most feasible insulation solutions in ultra-low temperature pipelines. The article will summarize the theoretical and technical ideas related to vacuum insulation of ultra-low temperature pipelines based on four aspects: heat transfer principles, structural improvements, process reality, and performance related factors. Based on a thermodynamic model combining radiation and conduction, this study investigates the heat transfer phenomenon of variable density multilayer insulation. Optimization analysis is conducted on support components, end thermal bridges, and vacuum interlayers, and basic processes for vacuum formation and maintenance are proposed. The relationship between operating variables, vacuum state, material properties, and insulation is summarized and explained. The research involved can serve as a theoretical basis for optimizing the design of vacuum insulated pipelines, and has significant practical significance in reducing energy transmission losses and promoting the application of clean energy.

[Key words] ultra-low temperature pipeline; vacuum insulation; multi-layer insulation; heat transfer mechanism; vacuum maintenance

1 引言

全球能源结构正向清洁化转型,液化天然气、液氢、液氦等超低温介质应用持续拓展,输送过程中的冷量损耗直接影响系统效率与运行成本。这类介质沸点极低,少量热量侵入就会引发介质气化,造成能量损耗并带来管道安全隐患。传统多孔保冷材料在超低温工况隔热性能有限,难以满足远距离低漏热需求;真

空绝热依靠夹层真空抑制气体导热、多层反射降低辐射换热,绝热性能远超常规方案,是超低温管道主流技术。

现有研究已围绕传热模型、结构与工艺开展大量工作,但在变密度多层绝热传热修正、长期真空特性、多因素耦合分析方面仍存在短板。未修正的多层绝热计算模型难以反映变密度层实际传热规律,材料放气与吸气剂协同作用机制也尚不明确。为

此, 本文结合热力学理论与已有研究成果, 综合分析原理、结构、工艺及性能要素, 融合理论与工程实际, 给出发展建议与技术支持思路。

2 超低温管道真空绝热的传热机理与理论基础

2.1 超低温环境下的传热形式

真空绝热管道所遇的漏热是热传导、热辐射及残余气体传热三者同时作用的结果, 有关传热项的比例因真空度、温差和构造而有较大差异。若处于高真空状态, 夹层中气体分子的平均自由程远超间隙尺寸, 对流可以忽略, 残余气体按分子方式导热, 此时热流密度基本上同夹层气体压力成比例。固体所导致的热传导限于支撑体、绝热层接触或端部结构, 是除辐射外的重要漏热来源。热辐射本身依托夹层表面而发生, 对于极低温或大温差情形来说比例较高, 应以多层反射来加以抑制。

所讨论的温区中各类传热项的权重不是一成不变的: 液氮温区及液氢或液氦温区由于冷壁壁温和基本温度有别, 辐射所占比例随温度减低而变小, 但仍然很可观。多层绝热所用的间隔物虽可减少辐射效应却也增大固体接触的热导, 因而要处理好抑制辐射同固体导热上升的矛盾, 这是多层绝热设计中必须面对的基本问题。

2.2 真空绝热的热力学数学模型

要对绝热性能做合理分析必须先有正确热力学模型。按超低温流体的要求来看, GERG-2008所述方程在计算上比LKP和P-R方程更精确, 能恰当地给出有关低温混合物的密度、焓及导热能力各项数值, 因而利于传热设计。若考虑热辐射同热传导两者的联合作用, 就可以确定管内轴向和径向温度状态, 把全部温差及漏热都纳入定量计算的范围。

对多层绝热传热做计算时, 一般所用的Lockheed方程只适合均匀层密度情况, 不能直接用于变密度优化。若采用逐层分析法来建立三项传热模型, 就可以分别考虑辐射、固体接触及气体传热诸因素, 利用间隔物的光学特性重新估计辐射项, 把层密度同压缩压强对应起来再结合试验结果处理固体接触热阻, 按气压分布调整气体传热项, 由此获得较现实的修正方案。以贪心算法反复运算可得最佳变密度间隔物分布, 较原均匀设计有更小的平均热流密度^[1]。

3 真空多层绝热系统的结构优化设计

3.1 多层绝热材料的层间配置优化

多层绝热是高真空管道的核心部分, 由高反射率箔材与低导热间隔物交替堆叠构成, 绝热性能与层密度、层间压力、材料物性直接相关。均匀层密度结构难以兼顾高低温侧传热特性, 变密度结构可沿温度梯度调整层间距, 实现不同温区的传热匹配, 在不增加材料用量的前提下提升绝热效果。

层间配置要同时处理辐射抑制及固体导热两类问题。所用反射屏的个数及其反射能力是辐射热阻的决定因素, 而间隔物的种类、厚度或压缩状态对接触热导有直接关系。若以交错方式来缠绕材料, 就可安排好层间空隙、排气口, 把达到真空的时间及最后真空度都提高。间隔物的分布可用修正的逐层法加以

计算, 按总层数的限制重新分配温区所占层数, 将各处热流密度统一到最小水平。

若所用间隔物较多, 材料的放气量就会上升, 此时层间真空状态及气体传热所占比例都可能改变, 要处理好优化问题须把放气情况考虑进来, 不能只压制辐射而使气体传热回升, 否则绝热效果变差。

3.2 管道支撑与端部结构的传热路径优化

除多层绝热主体漏热外, 支撑与端部连接结构的固体导热是另一重要漏热来源, 且热流密度较高, 常成为局部绝热薄弱环节。传统单体圆柱式支撑接触面积大、传热路径短, 漏热量偏高; 一体式支撑可在提升结构强度的同时优化传热路径, 配合接触点圆顶设计减小接触面积, 有效降低支撑导热漏热。

管道端部所用的内外管连接是关键部位, 一般以平板形式作端面时应力集中、导热太迅速、漏冷多。若改用热桥式端部构造, 热量传输路径就变长, 端部导热速度下降, 应力状态也较优, 低温结构更可靠。对管路连接点施以小真空处理能获得整体高真空效果, 不会留下连接处的绝热缺陷, 所耗能量因而较少。多通道系统应按温区需要配置分层冷屏, 依序截断热量, 把内层各段的漏热控制住, 使多温区之间达到协同绝热的目的^[2]。

3.3 真空夹层的参数匹配设计

真空夹层厚度是影响绝热性能与经济性的重要参数, 需结合介质温度、绝热结构与工艺可行性综合确定。-196℃温区的常规低温介质多采用25mm夹层厚度, 液氢、液氦等超低温介质可增至28mm, 在控制结构尺寸的前提下进一步降低夹层热传递。

夹层厚度不能一味地加大, 太大将使所用材料、抽气工作都变得繁重, 结构刚度也有所下降, 应把绝热效果和工程成本作一平衡考虑。对内外管壁的厚度要同时考虑结构强度及传热要求, 内管有低温及内压两类载荷, 外管经受大气或真空状态, 恰当壁厚可让力学性能成立而固体传热面不致过大。多层绝热设计要留出合理间隙配合内外管壁, 既不令各层互相导热又不因接触而变形, 还需给低温形变以释放余地, 防止冷态下层体密度过高、失去弹性。

4 真空绝热系统的真空维持与工艺实现

4.1 多元吸气剂体系的设计与活化工艺

对真空夹层而言, 长期维持真空是绝热性能稳定的要点。管道及所用绝热材料都以微小速率放出气体, 使夹层真空度慢慢变差, 若只按起始状态抽真空不能保证长久使用效果, 必须利用吸气剂来持续清除残留气体。单独使用某种低温吸气剂所涉气体种类有限, 其常温或低温效率亦有差别; 若将分子筛、活性炭和吸氢剂配合起来, 就可同时处理常温、低温下的多种残余气体, 而专用吸氢剂本身对于液氢管道所遇的氢渗透现象是良好对策。

吸气剂的效能是以活化为基础的。若对所用多元吸气剂做活化处理(即清除其内含的气体、杂质), 再将活化物密封于真空之中, 按需要拆封装入夹层, 就能使吸气剂一开始就是高效的。各类型吸气剂活化应有相应温度及时间, 要依据材料本身来定工

艺,既要防止因活化不够而吸附能力差,也要避免活化太强造成材料性质的损害^[3]。

4.2 真空获得与除气工艺的优化

初始真空度直接决定绝热系统初始性能,除气工艺的彻底性是获得高真空的核心。传统直接抽气难以彻底清除材料表面吸附与内部溶解的气体,运行中放气速率快,真空度衰减迅速。采用热氮气冲洗工艺,抽真空过程中通入加热氮气,通过吹扫置换带出材料内部吸附气体,可使除气更彻底、放气更充分,显著提升初始真空度与维持能力。

多层绝热缠绕所用工艺是排气效率的关键因素。若以预制钢针作辅助而采用交错包覆法,就可在绝热层中得到连通的排气通道,防止各层之间积聚“气袋”类气体,使排气快、层间真空较均匀。要按分级抽气思路来获得真空:先抽走大气成分,继之以升温除气,最后得到高真空效果,切勿因抽得太急而损及绝热结构。所获夹层真空常能低于0.001Pa,这是良好绝热状态的基本保证。

5 超低温真空绝热管道的性能影响因素分析

5.1 运行参数对绝热性能的影响

所讨论的运行参数对流体温度及管壁热状况有直接的调控作用。入口压力和流体流速应作为基本参数考虑:入口压力大即意味着介质达到较高饱和温度,管壁一环境温度差小,单位面积漏热所占比例低;而介质流速又以对流方式影响管内热量传递,流速在适当范围内可以改善温度分布(轴向温差缩小),使介质各部分较均匀地升温,从而加大输送可能的距离。

管道内径是绝热效果及输送能力所依附的耦合因素。增大管径会使内表面积同容积的比例变小,每单位体积介质对应的实际漏热面减少,壁面所受热量密度低一些,介质升温较缓,单程输距因而较长。不过增大管径要多用材料、增加建设费用,应将输送量与长度一并考虑后做选择。有关预冷阶段的轴向或径向温差要纳入绝热结构热应力及初始漏热分析范围,控制好预冷速度有助于防止因温度梯度过高而损坏结构^[4]。

5.2 真空度与绝热性能的耦合关系

真空度对绝热管道所涉性能来说是最基本、最重要的参数,和绝热情况有强非线性联系。在低真空范围内所遇的残余气体仍属较大热源,此时热流密度随压力减小迅速减少;高真空情形下气体类传热所占比例已不大,热流密度的降速变缓;若使真空达到超高程度,气体传热基本不起作用,漏热多来自辐射或固体传导,再增加真空度对绝热效果的改善意义不大。

有关多层绝热结构的论述中,所称的真空度不等于各层实际的真空度,材料放气将使层间气体压强超过夹层平均值,促进传热。冷、热两端各自温度又会改变层间所遇压力状况,高温区有较大放气量,层间压力因而较高。若用多种吸气剂来处理放气

现象,就能长期保持层间及夹层的高真空,让性能较稳定地延续,管道寿命和维修间隔都可相应拉长。

5.3 材料物性随温度的变化效应

若处于超低温状态,所用材料的物理及力学特征将有较大变动,绝热系统因此不能按常规方式设计。对于导热系数或反射屏发射率这类物性量、对于间隔物的接触热阻来说,低温下表现都非恒定,不能单靠常温数据做超低温分析,应结合温度修正项对模型加以改进以提高精确度。

若管道所用结构或密封材料发生低温脆化、收缩或弹性模量改变,就会对密封及力学状态有所妨碍;密封失效本身可造成真空破坏或介质泄漏问题。对于高分子材料来说,超低温下的性能衰退是比较突出的现象,很多常温表现良好的种类低温时变硬、回弹能力差,不适用于间隔或密封设计。材料选择应结合实际工作温度做低温试验分析,考察所涉温区的性能是否稳定,以使整个系统在各温度条件下都运行得当^[5]。

6 结论

超低温管道真空绝热技术是清洁能源储运与低温工程的基础支撑技术,性能取决于传热机理认知、结构设计与工艺优化。综合传热理论、结构及制造工艺得出四点结论:修正逐层模型用于多层变密度绝热设计,可平衡辐射与固体导热,绝热效果优于均匀结构,补充气体传热与间隔物参数可提升计算准确度;优化支撑与端面热桥可抑制局部漏热,全真空夹层能够弱化缺陷,实现漏热均匀;多种吸气剂配合热氮气除气工艺,是维持超高真空、保障绝热稳定性的关键;管径、流速、真空度、材料特性相互耦合,合理匹配参数可最大化输送效率。

该技术未来将向智能化、长寿命发展,依托智能计算开展性能预测与全生命周期分析,开发低放气绝热材料及大容量吸气剂,改善管道工况,降低维护频次。

[参考文献]

- [1]徐子凡.LNG长输管道中低温工质流动传热机理研究[D].西安石油大学,2025.
- [2]邹波,雒川,罗敏,等.高效绝热超低温输送管道(液氢真空管道)[Z].2024.
- [3]伍世贤.多通道低温管线的优化设计与真空多层绝热传热研究[D].中国科学技术大学,2023.
- [4]周博博.大型空分装置低温管道的设计与运用[J].化工设计,2021,31(5):14-17+20+1.
- [5]王伟龙.LNG超低温阀门保冷层传热分析及密封材料性能研究[D].兰州理工大学,2018.

作者简介:

张彪(1986--),男,山东聊城莘县人,本科,从事工作:化工设计。