

大型LNG储罐感温光缆的敷设方法研究

张学亮¹, 刘树锋¹, 姜兆公²

¹中石化烟台龙口液化天然气有限公司, 山东 烟台

²上海复栋智能科技有限公司, 上海

收稿日期: 2024年11月25日; 录用日期: 2025年1月2日; 发布日期: 2025年3月12日

摘要

光纤温度检测技术在LNG储罐的温度检测应用越来越成熟, 将感温光缆成功有效地敷设到需要温度检测位置并确保感温光缆不受LNG储罐其他施工环节的影响, 是光纤温度检测技术能够成功应用在LNG储罐温度检测的关键。结合以往的项目经验, 通过研究感温光缆在LNG储罐不同位置的敷设方式, 完成大型LNG储罐感温光缆的敷设方法建议, 为后续项目提供参考。

关键词

光纤温度检测, 大型LNG储罐, 感温光缆敷设

Research on the Laying Method of Temperature Sensing Optical Cable for Large LNG Storage Tanks

Xueliang Zhang¹, Shufeng Liu¹, Zhaogong Jiang²

¹Sinopec Yantai Longkou LNG Co., Ltd., Yantai Shandong

²Shanghai Photon Smart Science & Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: Nov. 25th, 2024; accepted: Jan. 2nd, 2025; published: Mar. 12th, 2025

Abstract

The application of optical fiber temperature detection technology in the temperature detection of LNG storage tanks is becoming more and more mature. Successfully and effectively laying the temperature-sensing optical cable at the positions where temperature detection is needed and ensuring that the temperature-sensing optical cable is not affected by other construction links of the LNG storage tanks are the keys to the successful application of optical fiber temperature detection technology in the

temperature detection of LNG storage tanks. Combining previous project experience and by studying the laying methods of the temperature-sensing optical cable at different positions of LNG storage tanks, suggestions on the laying methods of the temperature-sensing optical cable for large LNG storage tanks are completed to provide references for subsequent projects.

Keywords

Optical Temperature Detection, Large LNG Tank, Temperature Sensing Optical Cable Laying

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近几年随着我国 LNG 接收站的蓬勃建设与发展, 光纤温度检测技术也越来越多地参与到了 LNG 储罐的温度检测应用。光纤温度检测从刚开始的 LNG 泄漏检测, 逐步扩展到检测珍珠岩沉降, 最新的龙口 LNG 项目中已将光纤温度检测应用到整个 LNG 储罐内罐的表面温度检测, 大有全面替代传统热电阻式温度检测技术。感温光缆直径约 4 mm, 在 LNG 储罐建设过程中易受损, 因此需要设计感温光缆的敷设方式, 既要保护感温光缆, 又要保证感温光缆的温度检测效果。

2. 光纤温度检测技术简介

对于大型 LNG 储罐主要采用分布式光纤温度检测系统。分布式光纤温度检测技术主要是利用光在光纤中传输时产生的拉曼散射效应及光时域反射技术实现光纤温度的连续测量与定位。

分布式光纤温度检测系统在 LNG 储罐中的检测应用主要分为光纤温度检测系统主机、通信光缆、感温光缆三部分。系统拓扑图如图 1 所示:

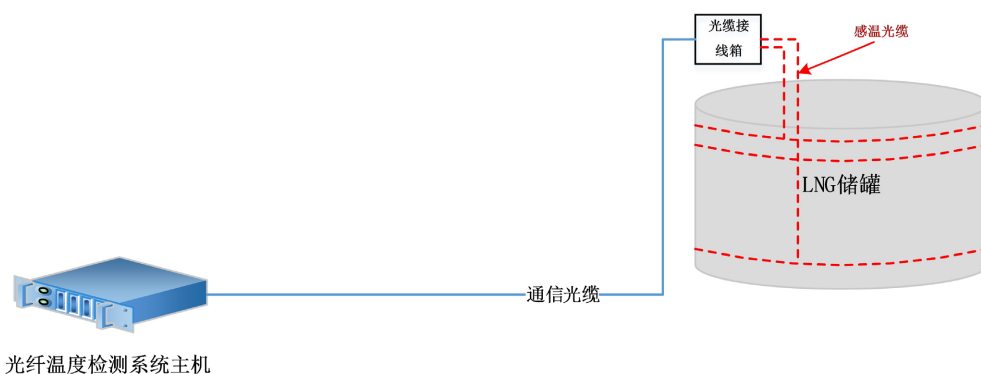


Figure 1. Application topology of optical fiber temperature detection system for LNG storage tank
图 1. 光纤温度检测系统 LNG 储罐应用拓扑图

感温光缆安装在储罐内需要检测温度的位置; 通信光缆将感温光缆检测到的温度数据传输到中控室的光纤温度检测系统主机上。

3. 感温光缆的结构研究

感温光缆是光纤温度检测系统的温度传感器, 相当于点式热电阻式温度检测系统的前端热电阻传感

器。为了保障感温光缆的敷设安全，首先需要设计感温光缆的结构，使得感温光缆自身不易受损。

在以往的 LNG 储罐建设项目中主要有采用双层钢管的结构、双层钢管加外层钢丝铠装结构和双层钢管中间加钢丝铠装三种结构。从实际比对测试下来，双层钢管和双层钢管加外层钢丝铠装两种结构，在敷设过程中易发生折弯而使钢管断裂导致里面的感温光纤断裂。双层钢管加中间钢丝铠装结构的感温光缆相比其他两种结构的，在同等弯曲条件下钢管不易断裂，里面的感温光纤也不易受损，因此建议选用双层钢管加中间钢丝铠装结构的感温光缆在 LNG 储罐温度检测中的应用。

双层钢管加中间钢丝铠装结构的感温光缆结构如图 2 所示：

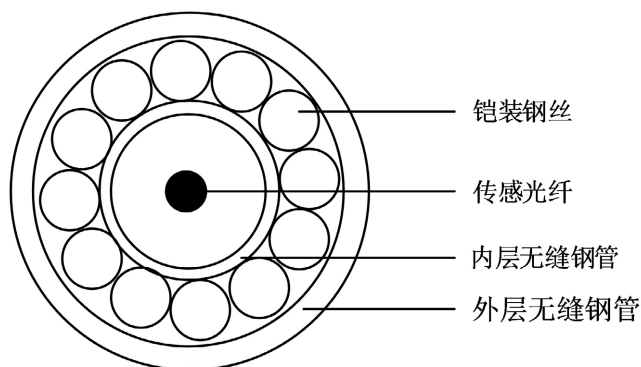


Figure 2. Structural drawing of double-layer steel pipe and intermediate steel wire armored temperature sensing optical cable
图 2. 双层钢管加中间钢丝铠装感温光缆结构图

4. LNG 储罐温度检测需求及光纤温度检测系统感温光缆敷设研究

目前我国的标准规范中对 LNG 储罐的温度检测要求主要是基于传统热电阻式温度检测技术设计的，内罐的温度计主要监测预冷及升温，外罐温度计主要监测泄漏[1]。

光纤温度检测为了满足 GB51156-2015 标准中对 LNG 储罐温度检测的要求，在储罐内布设的方案如下：

- 在外罐内壁的底部布设 1~2 圈感温光缆，主要用于检测 LNG 泄漏，当发生 LNG 泄漏时，漏冷会顺着罐顶向下到罐底，因此只要在罐底敷设感温光缆即可实现 LNG 泄漏检测，同时采用完整一圈的敷设方式，可实现任一点的 LNG 泄漏检测，相比热电阻式温度检测，减少了漏检率和有效缩减了检出时间。

- 在外罐内壁的顶部珍珠岩可能发生沉降的最低位置至珍珠岩正常填充的最高位置之间平均布设 2~3 圈感温光缆，主要用于检测珍珠岩沉降[2]。珍珠岩是大型 LNG 储罐重要的保冷材料，珍珠岩会随着时间自然沉降，当珍珠岩沉降到一定高度，LNG 储罐内罐的低温就会传递到 LNG 储罐的外罐，严重时会导致外罐变形受损。采用 2~3 圈在外罐内壁上不同高度水平敷设的方式，可以有效检测出珍珠岩沉降的高度，同时采用感温光缆的技术，水平位置上任一点的珍珠岩沉降都可以被有效检出，相比热电阻式温度检测，减少了漏检率和有效缩减了检出时间。

- 在内罐底部以“十”字型或“一”字型布设感温光缆，主要用于储罐预冷温度检测。储罐冷却过程需要监控的数据主要包括罐底温度、罐底温度监测点最大温差、冷却速率、喷淋流量、储罐压力等参数。为了防止罐底不同位置温差过大导致储罐变形过大，要求冷却过程中内罐底部任意两个相邻检测点的温度差不得超过 30℃，任意两个检测点的温度差不得超过 50℃ [3]。通过“十”字或“一”字型方式布设感温光缆，可实现实时检测预冷时罐底的温度情况，为 LNG 储罐灌装提供准确操作的指导依据。

- 在内罐外壁热保护角处水平布设 1 圈感温光缆，主要用于热保护角的温度检测；相比较热电阻的

方式，需要在每个热保护角布设一个热电阻式温度传感器的不同，通过在热保护角水平位置布设一圈感温光缆即可实现所有热保护角的温度检测需求。

- 在内罐外壁的表面水平或上下环回的方式布设感温光缆，主要用于检测内罐的实时温度[4]。GB51156-2015 标准中要求 LNG 内罐应设置多点温度计，相邻 2 个测温点之间的垂直距离不超过 2 m [1]，若采用水平布设的方式，则至少需要每隔 2 米布设一圈感温光缆，不考虑投资成本和安装难度，此安装方式最能满足内罐的温度检测需求；若采用上下环回的布设方式，以光纤温度检测系统 1 米的精度，完全满足 GB51156-2015 标准中相关技术的要求，同时根据 LNG 储罐内罐直径的大小，选择最佳的垂直间隔距离，即方便施工又节省了成本，相比较热电阻的方式，温度检测点数提升了 40 多倍，为 LNG 储罐的安全提供更精细化的温度检测数据。

通过上述方案设计形成如图 3 所示的完整感温光缆布设，基本实现 LNG 储罐的全方位温度检测。

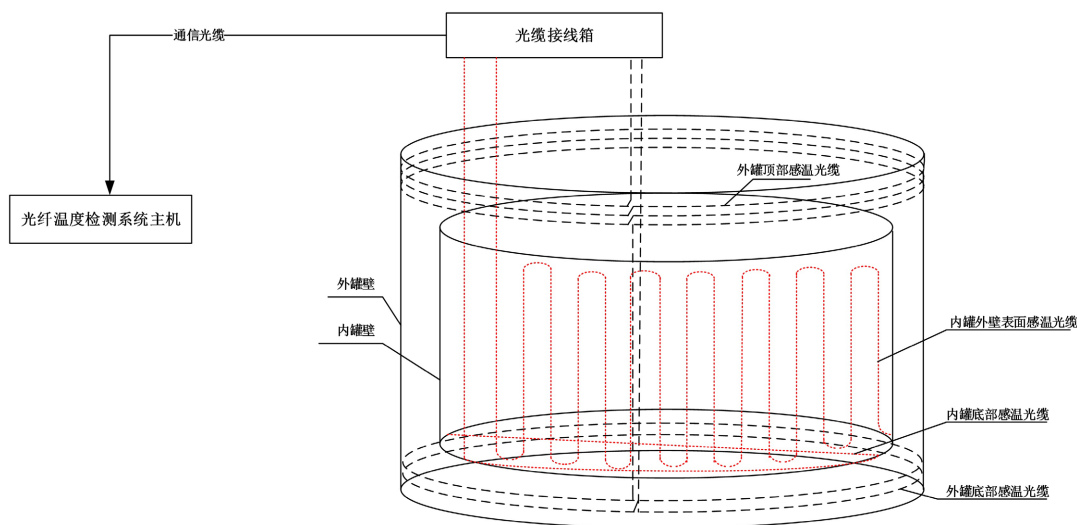


Figure 3. Schematic diagram of installation position and mode of temperature sensing optical cable in LNG storage tank

图 3. 感温光缆 LNG 储罐内安装位置及方式示意图

5. 感温光缆的固定方式研究

为了保障感温光缆不受损伤，同时又需保障感温光缆的感温效果，总结了多个项目的经验，根据感温光缆安装的不同位置，应采取不同的固定方式。

外罐内壁底部的感温光缆宜采用角钢的方式进行固定。角钢宜采用“>”型焊接在外罐内壁的钢板上，光缆从“>”型的缝隙中穿过(图 4、图 5)。

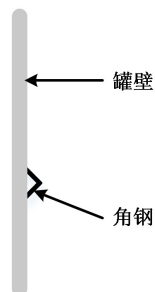


Figure 4. Side view of angle steel installation

图 4. 角钢安装侧视图

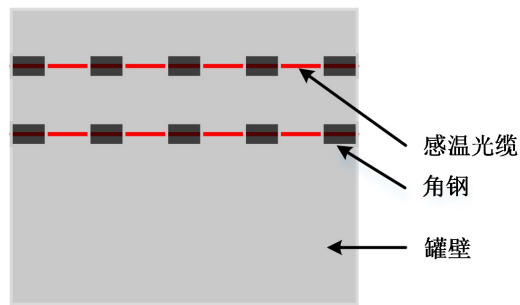


Figure 5. Overall schematic diagram of angle steel fixation
图 5. 角钢固定整体示意图

外罐内壁顶部的感温光缆，根据是否施工聚氨酯(PUF)隔冷，采用不同的固定方式。若不施工 PUF，则宜采用与内罐外壁底部的感温光缆相同的固定方式。若在外罐内壁顶部施工 PUF，则需采用“一种固定装置”[5]如图 6、图 7 所示进行固定。PUF 通常施工在外罐内壁顶部珍珠岩可能发生沉降的区域，PUF 的厚度约为 10 cm，若此处的感温光缆贴和外罐内壁敷设，则会被 PUF 覆盖而大大降低测温效果，因此在龙口 LNG 接收站项目中设计了“一种固定装置”[5]将感温光缆垫高 10 cm，与 PUF 的厚度相当，在保护感温光缆的同时，又未影响感温光缆的感温功能。

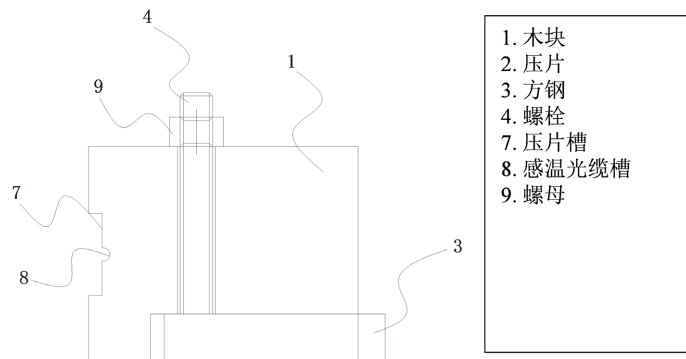


Figure 6. Figure 1 in “a fixing device” [5]
图 6. “一种固定装置” [5]中的图 1

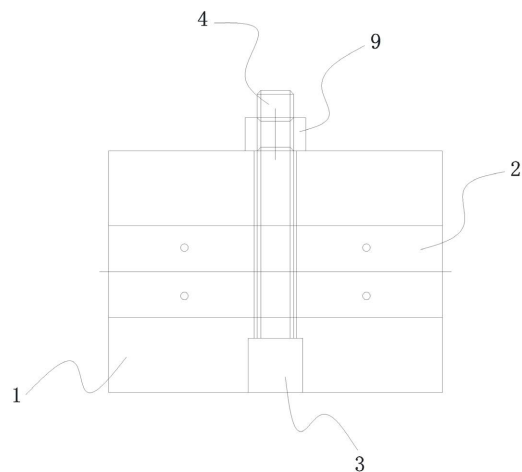


Figure 7. Figure 2 in “a fixing device” [5]
图 7. “一种固定装置” [5]中的图 2

内罐底部的感温光缆宜先根据确定的布设方式，在内罐底部水泥浇筑前预埋好钢管，感温光缆再进行穿管敷设。

内罐外壁感温光缆建议如图 2 所示上下环回的方式敷设，采用角钢的方式进行固定；也可以间隔 2 米的方式一圈一圈敷设，采用角钢的方式进行固定。

对于热保护角处感温光缆，可在敷设内罐外壁时，待感温光缆敷设到热保护角位置时使感温光缆覆盖到热保护角即可。

6. 应用案例

某 220000 m³ 的 LNG 储罐表面温度检测实际采用了光纤温度检测系统，感温光缆的敷设方式采用如图 3 所示的方法。现场部分安装实际图片如图 8、图 9 所示：



Figure 8. The actual installation diagram of the temperature-sensing optical cable on the inner wall of the outer tank
图 8. 外罐内壁感温光缆实际安装图

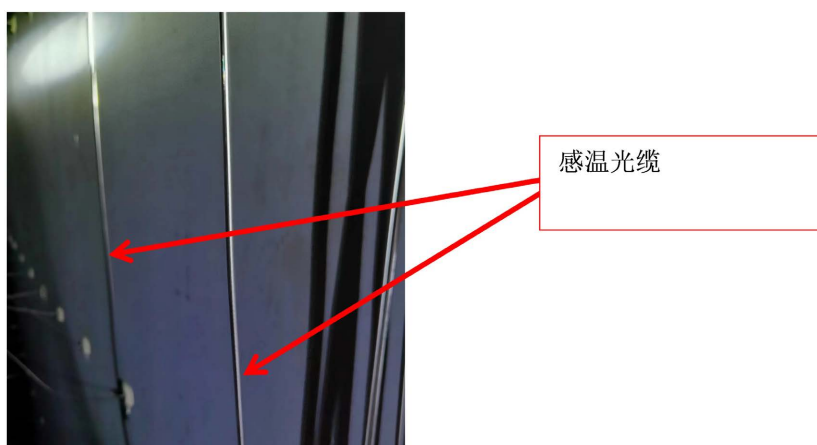


Figure 9. The on-site laying diagram of the temperature-sensing optical cable on the outer wall of the inner tank
图 9. 内罐外壁感温光缆现场敷设图

现场实际敷设感温光缆时，需要保证感温光缆整根完整无断裂，在狭小的内外罐环隙空间进行施工，不可避免的发生感温光缆折弯等情况，本项目采用了双层钢管加中间钢丝铠装结构的感温光缆，敷设结束后感温光缆经 OTDR (光时域反射仪)检测正常。

后续又在珍珠岩填充过程中的关键节点对已敷设完成的感温光缆进行检测，经检测珍珠岩填充未对感温光缆的质量造成影响。

最后在 LNG 储罐内部施工全部完成后经 OTDR 检测，感温光缆传输损耗正常，验证了感温光缆的敷设成果。同时也验证了感温光缆敷设方法的可行性。

7. 总结

通过采用光纤温度检测技术实现 LNG 储罐温度检测，温度检测的范围远远大于传统的温度检测技术，为精准分析 LNG 储罐的安全提供有力的支撑数据。感温光缆相当于光纤温度检测系统的前端探头，一旦感温光缆损坏，将导致光纤温度检测系统整体失效。因此储罐内感温光缆除了需要在结构设计和生产制造过程加强自身安全，更需要在敷设过程中设计适合的敷设方式，通过总结了多个项目的实际敷设情况，完成了 LNG 储罐不同温度检测需求的感温光缆敷设与固定方式确认，并在龙口 LNG 项目中得到实际验证经济、安全、可靠。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局. GB 51156-2015 液化天然气接收站工程设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [2] 徐征. 分布式光纤测温系统在液化天然气储罐珍珠岩沉降监控中的应用[J]. 流体测量与控制, 2024(2): 31-34.
- [3] 成永强, 田士章, 等. LNG 接收站试运投产中储罐冷却的相关问题[J]. 油气储运, 2013(5): 517-520.
- [4] 中国石油化工股份有限公司. 一种用于全方位检测 LNG 储罐内罐温度的装置[P]. 中国专利, 202420390378.6. 2024-11-08.
- [5] 中国石油化工股份有限公司. 一种固定装置[P]. 中国专利, 202323230035.8. 2024-7-26.