

液化天然气管道预冷技术工艺优化

李钰璇（中石化舟山液化天然气有限公司，浙江 舟山 316000）

摘要：液化天然气存储、运输过程中常面临诸多风险，加强预冷工作对降低风险具有重要作用。随着当前液化天然气使用需求的增多，管道预冷工作受到了普遍关注，在行业内陆续产生了很多新理论、新技术。但管道预冷的专业性较强，有关人员应结合液化天然气管道的详细情况，科学选择设备，加强操作管理。基于此，本文重点分析了液化天然气管道预冷方面的优化措施，以期在实际工作提供参考与借鉴。

关键词：液化天然气；管道；预冷技术

中图分类号：TE832

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）027-0097-03

Process optimization of precooling technology for LNG pipeline

Li Yuxuan (Sinopec Zhoushan LNG Co., LTD., Zhoushan Zhejiang 316000, China)

Abstract: The storage and transportation of liquefied natural gas (LNG) involve numerous risks, making enhanced precooling crucial for risk mitigation. With the growing demand for LNG applications, pipeline precooling has gained widespread attention, leading to the emergence of various new theories and technologies within the industry. However, pipeline precooling requires specialized expertise. Professionals should scientifically select equipment and strengthen operational management based on detailed LNG pipeline conditions. This paper focuses on optimizing precooling measures for LNG pipelines, aiming to provide practical references and insights for real-world applications.

Key words: liquefied natural gas; pipeline; precooling technology

液化天然气管道预冷对保障低温输送的安全性具有重要的意义。根据调查，液化天然气低温输送过程中事故频发，造成了重大人员伤亡、经济损失。为有效防止此类事故，有关人员应考虑液化天然气的成分构成和输送方式，将管道预冷放在关键位置。传统的分段注氮预冷虽具有一定作用，但冷能利用率偏低、温度场不均，很多情况下管道预冷失效。为进一步提高液化天然气输送的安全性，降低管道脆性损坏、变形风险，有关人员应继续探究管道预冷方式，严格管理预冷过程。

1 管道预冷技术的优势

液化天然气输送系统的管道预冷方面，为符合经济性、节能性标准，一般不直接选取液化天然气作为冷却介质，而选择液氮。相对而言，液氮的成本优势显著，且其温度明显低于 LNG，这些特性有助于精准控制预冷温度。氮气为一种较为典型的惰性气体，冷却时与 LNG 接触几乎无燃爆风险，再加上其环保性突出，有助于达到预冷目标。管道预冷过程中若面临故障，液氮相对稳定，能形成相对安全的检修环境，快速排查故障并尽早维修。同时，液氮优异的干燥性还能避免管道内水汽凝结。然而，操作过程中还需采取其他防护措施，如液氮具有低温特性，工作人员需规范使用防冻装备；低挥发性导致局部区域的氧气浓度持续降低，有关人员应根据工作环境，科学布设专用通风装置，或者采用通风设计，保障空气流通^[1]。LNG 与液氮的对比如表 1 所示。

表 1 LNG、液氮参数对比

特性对比	LNG	液氮
温度标况	-161.5℃	-196.56℃
密度 (kg/m ³)	443 ~ 448	810
化学性质	易燃	惰性
单位气化量	约 625	约 696

2 LNG 管道预冷传统工艺

2.1 参照预定流程

为达到 LNG 管道预冷目标，准备阶段有关人员应设定各项关键参数。当选定液氮作为介质后，温度、压强、N₂ 分液罐压力、管道压力分别为 -19℃、150kPa (G)、26kPa (G)、26kPa (G)。开始预冷操作后，冷却时长 0.5h，在此阶段管道内温度无增大或减小现象。在此之后调整 N₂ 温度，维持 -40 ~ -30℃ 的温度区间，同步增大分液罐压力到 500kPa (G)，保持 90min 这一状态后，管道内部压力持续减小，下降速率为 1 ~ 2℃/h^[2]。在为期 4h 的冷却处理后，管道位移明显，偏移值达 28mm，并且管道内逐步为恒温状态，温度在 11.9℃ 左右。

2.2 分段式预冷

LNG 管道采用分段式预冷时，能提高预冷速率。具体操作中，有关人员需为 N₂ 设置若干排放点，注意每一排放点的位置和相邻排放点的距离，同步启动旁路泄放口。经过 2h 的持续冷却，管道系统的变化明显，表现为：位移监测数据显示管道累计偏移量为

38mm,同时温度传感器监测到管道维持在 -12.2°C 的低温状态。为保障降温速率,有关人员应注意与预冷注氮点距离最近、最远的两个排放点,分别将其开启和关闭。

2.3 爆破式预冷

在爆破式预冷下, N_2 温度的下降速率与预冷时间紧密关联,二者呈现反向变化关系。预冷时间越长, N_2 降温效果越明显。在冷却时间为18h时, N_2 温度大约为 -80°C ,且降温速度较快,基本为每小时3到 6°C ,且管道位移明显,位移值为100mm。液氮注入部位温度为 -20°C ,经过24h的连续冷却,首个补偿点附近区域呈升温趋势。为保持两点间温度的相对稳定性,在利用爆破式预冷法时,有关人员应通过以下操作冷却 N_2 :关闭旁路排放口,分别将上压与下压调整为160kPa(G)、30kPa(G),通过泄压创造气体流动条件,降低管道内部温度、控制上下温差。

3 施工难点

四川郝斯特油气技术有限公司承建的舟山LNG接收站,为我国典型的海岛型LNG接收站项目,其建设条件相对复杂。根据实际情况,该项目实施中面临诸多挑战,表现在以下方面:项目位于海岛,地理位置增大了液氮调配难度;项目所在地区为海洋性季风气候,台风和强降雨频繁,影响了正常的施工作业;液氮需求量大,单一供应商难以满足需求,需要协调多家供应商。

4 设备、设施及材料准备

该项目配备有多种专用设备,如处理能力为 $18500\text{m}^3/\text{h}$ 的气化装置,其中涉及2台高温气化器、8台低温气化器;2组增压撬装系统;2套低温气液分离装置等。为满足预冷施工标准,还配备了专用施工装备,如注氮管道系统、专用工具、施工人员防护装置。为实时监测现场的施工过程及效果,对比关键参数与设计标准的差异,还设计有监控装置,其中包含4只铂电阻温度计、4套远程监控终端。

5 预冷设备的连接

该项目注氮设备连接情况如图1所示。

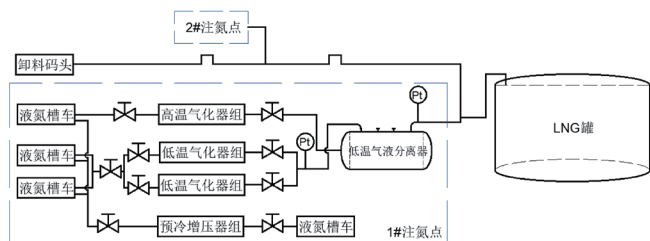


图1 注氮设备连接情况

传统的管道预冷处理中,主要为爆破预冷,操作中需在管道内维持0.2MPa压力,此压力条件影响了

管道的焊缝性能和强度指标,操作风险较高。为有效应对此类问题,实际的工作中需采取必要的改进措施,在原有预冷方案的前提下新增两个注氮口,保障预热效率,减小预冷过程对管道焊缝等的不利影响。但需注意,两个注氮口的选址非常重要,1号注氮口在储罐一期预留管线的转角部位;2号注氮口则在中段管道的预留接口部位^[3]。

液氮槽车的增压方面,有关人员应科学配置外部增压装置,注意该装置的安装位置,并科学设定该参数。通过这一方式,可提高液氮输送效率,为管道预冷提供稳定的氮气。实际的操作中应遵循以下配置要求:1#、2#各设置1台 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 标准气化器、1台 $1500\text{m}^3/\text{h}$ 高温气化器、4套 $2000\text{m}^3/\text{h}$ 低温气化器。

本项目运行过程中,为保障低温气化分离器的高效运行,还需做好防护工作。如在分离器顶部应安装液相监测装置,用此装置确保输出介质始终为气相状态。管网系统则需配备压力保护装置,但需将此装置的压力控制在0.06MPa左右。为实时监测温度参数,分离器前后则应安装温度传感器。同时,分离器出口需安装流量传感器,采集流量参数。为发挥这些监测装置的作用,专业人员应遵循有关标准,将这些装置与远程监控系统相连接,保障实时采集和传输数据,随时监控预冷过程与参数。

5.1 优化预冷作业工法及流程

5.1.1 设备材料简介

本项目的液化天然气管道预冷中,液氮为制冷介质。在预冷过程中涉及多种设备,如液氮运输槽车、高效气化装置、低温气液分离器、预冷管道、低温电磁控制阀、超低温金属软管等。

5.1.2 基本工艺连接

本项目的连接要求较高,主要如下:第一,将液氮槽车定位到指定地点,通过耐低温金属软管保持可靠连接。第二,总系统为双路设计,两路分别与常温气化器、低温气化器连接,在每路均安装独立的气动电磁阀控制单元。第三,两组气化器出口均设置紧急切断装置,在突发情况下操作该装置切断电路。在此过程中,常温气化器输出部分接入气液分离罐顶部接口,低温气化器通过带有保护装置的低温汇管,连接至分离罐底部法兰^[4]。第四,每种监测装置都有其安装位置及连接要求。如气液分离罐末端分别安装温度、压力、流量监测仪器。全部仪表信号经专用电缆与控制系统连接。

5.2 工法简介及工作原理

第一,控制温度。管道预冷遵循分段降温原则。具体的工作中,率先通过气化器将液氮转化为低温氮

气，持续冷却卸料管起始段。在管道中段温度传感器监测到温度下降到 -60°C 时，立即开启中段预冷作业点，开始降低管道后半段、卸料口的温度。当卸料口末端温度达 -120°C ，管顶与管底温差在 50°C 以内时，结束预冷作业。第二，调节流量。采取自动化控制方式，当液氮槽车出液阀全开时，经中央控制柜调节气动电磁阀开度，将液氮流量控制在合理范围。由于自动化和智能化控制特点，能提高控制效率，保障控制精度。第三，安全防护。为避免未完全气化的液氮进入管道系统，在管道末端需设置气液分离装置。由于此装置的功能，可在预冷过程中自动分离气相和液相氮，保障仅气态氮进入管道。第四，稳压。本项目采取“Y”型双路连接方案，如图 2 所示。在此连接方式下，液氮槽车的工作压力相对稳定，能保障持续稳定的液氮供应。



图 2 流程运行方向从右到左

6 预冷工作情况

LNG 管道预冷的关键在于逐步降低温度，避免常温管道直接接触低温 LNG 而出现材料脆性损坏。与传统的 BOG 预冷相比，本项目所采用的预冷工艺具有经济合理性、操作便捷性。具体而言，原先的 BOG 预冷下，LNG 船舶长期停泊，成本高且面临安全风险。以液氮为介质实现分段预冷，能将输送管道分为 A、B 两段，通过优化注氮过程提高预冷效率、效果。实际操作中，当 B 段 31 点温度降至 -90°C 时，气动 2# 注氮点，该注入方式可降低氮气损耗。另外，为保障管道预冷效果，有关人员还需科学控制各项参数，如将降温速度在 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 以内，管道截面温差不超 50°C 。

从 LNG 储罐到卸料臂的低温管线总长 0.9km，

管径为 40in。管道外壁采用聚氨酯泡沫保温材料，由于该材料的性能特点，能起到保温防护作用。沿线共设置 12 组温度传感器，在预冷处理期间这些传感器能实时采集管道截面的上下温度参数。同时，管道末端同样设有插入式温度计，可测定温度值。根据本项目的预冷过程，总预冷时长 61h，其中维持低温阶段 44h。1# 注氮口累计运行 48.5h，2# 注氮口运行 2.5h^[5]。经长期监测，2# 注氮点启用后，降温效率大大提高。预冷过程中遇到的问题及处理方式如表 2。

7 结语

液化天然气的管道预冷要求高、难度大。为达到预期的预冷效果，有关人员应结合预冷要求等，科学选定预冷工艺，合理控制关键参数，监测预冷过程。未来的工作中，有关人员应根据液化天然气管道预冷情况，创新技术形式，优化工艺流程。

参考文献：

[1] 李萌. 液化天然气设施预冷工艺选择与优化策略研究 [J]. 中国石油和化工, 2024,(12):63-65.
[2] 王琳. 掺氢天然气丙烷预冷混合制冷剂液化分离影响因素 [J]. 油气与新能源, 2024,36(03):21-29.
[3] 杨小辉, 薛文瑞. 探讨液化天然气安全管理中存在的问题及对策 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023,43(14):95-97.
[4] 王沛. 液化天然气 (LNG) 接收站低压外输管道氮气预冷仿真优化 [J]. 广东化工, 2023,50(11):101-104.
[5] 田烨. 液化天然气低温管道保冷效果的控制方法探讨 [J]. 化工装备技术, 2023,44(03):9-13.

作者简介：

李钰璇 (1995-)，女，汉族，湖南益阳人，硕士，助理工程师，研究方向：LNG 接收站工程项目建设物资采购管理，LNG 接收站工艺。

表 2 卸料管线预冷过程中可能出现的问题及解决措施

类别	现象	解决措施
温度	管道温度下降过快，降温速度超过每小时 10°C	提高高温气化器处理能力，或降低低温气化器处理能力
	管道截面存在明显温度梯度，顶部和底部的温差 $> 50^{\circ}\text{C}$	合理降低当前注氮系统的输出排量，或启用第二注氮点的备用系统
	管道终端降温缓慢，未达 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 标准	激活第二注氮点的专用装置
压力	管道压力频繁变化，波动幅度大， $> 6\text{kPa}$	终止供应低温氮气，利用放空口释放压力
保冷层	保冷层结霜	预冷速率下降 50%，结霜严重时中断氮气供应；全面排查结霜原因，评估保冷系统参数是否合理，科学调整；更换高性能保冷材料
	保冷层遇冷收缩，局部分布有裂纹	降低预冷速率，收缩、开裂严重时不再继续氮气供应；用新保冷层取代旧保冷层
	温度监测显示装置出现故障	与仪表专家联系，及时排查和维修故障