

# LNG 储罐预冷选用液氮与 LNG 两种不同介质 方案对比分析

欧阳虎 黄科运 宋志焱 (国家管网集团天津液化天然气有限责任公司, 天津 300451)

**摘要:** LNG (液化天然气) 储罐的预冷是接收站和天然气液化厂投产过程中不可或缺的重要环节, 对后续 LNG 储罐能否正常运行起着至关重要的作用。在预冷作业的过程中, 常用的预冷介质是液氮和 LNG, 这两种预冷介质各有优缺点, 本文主要针对某 LNG 接收站二期项目新建 LNG 储罐预冷作业选用液氮与 LNG 这两种不同介质的技术方案进行对比分析, 旨在对二期项目采用 LN<sub>2</sub> (液氮) 与 LNG (液化天然气) 喷淋两种技术方案进行 LNG 储罐预冷的可行性展开分析, 主要涉及现有系统适配性论证以及实施风险分析。

**关键词:** 预冷; 液氮; LNG 储罐

中图分类号: TE972 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 003-0123-04

## A Comparative Analysis of Schemes Using Liquid Nitrogen and LNG as Different Media for Pre-cooling LNG Storage Tanks

Ouyang Hu, Huang Keyun, Song Zhiyan (Tianjin LNG Co., Ltd., PipeChina, Tianjin 300451, China)

**Abstract:** The pre-cooling of LNG (liquefied natural gas) storage tanks is an essential step in the commissioning process of receiving terminals and natural gas liquefaction plants, playing a critical role in ensuring the subsequent normal operation of LNG storage tanks. During the pre-cooling operation, liquid nitrogen and LNG are commonly used as cooling media, each with its own advantages and disadvantages. This paper conducts a comparative analysis of the technical schemes using liquid nitrogen and LNG as different cooling media for the pre-cooling of newly built LNG storage tanks in the second phase of the Tianjin LNG Receiving Terminal project. The aim is to analyze the feasibility of using LN<sub>2</sub> (liquid nitrogen) and LNG spray as two technical solutions for pre-cooling LNG storage tanks in the second phase of the Tianjin project, focusing on the compatibility assessment with existing systems and the analysis of implementation risks.

**Keywords:** Pre-cooling; Liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>); LNG storage tank

### 1 LNG 储罐 LN<sub>2</sub> 预冷方案说明

#### 1.1 方案简述

某 LNG 二期共有 6 座 220000m<sup>3</sup> 储罐, 原设计采用 LNG 进行预冷, 如果采用 LN<sub>2</sub> 进行预冷, 需外购的 LN<sub>2</sub> 槽车进行 LN<sub>2</sub> 临时供应, 根据现场目前建设情况, 需对二期项目 LNG 预冷管道进行改造, 增设 6 寸 LN<sub>2</sub> 临时接口, 才能满足预冷需求。槽车供应 LN<sub>2</sub> 期间采用自增压方式维持自身罐体压力, 将 LN<sub>2</sub> 通过新增接口压送至 LNG 储罐的预冷管线, 进行 LNG 储罐的 LN<sub>2</sub> 喷淋预冷。

#### 1.2 可行性分析

##### 1.2.1 现有系统适配性

某 LNG 为已建接收站进行二期扩建, 按照二期项目设计文件内容, 储罐本体、低温管线、低温阀门、预冷用喷头等设备设施的设计规格, 均按照 LNG 介质的相关技术标准、参数开展设计, 如果使用 LN<sub>2</sub> 进行预冷作业, 预冷过程中局部预冷温度有可能低于 -185℃, 超出原本系统设计的温度范围。主要系统适配问题描述如下:

##### 1.2.1.1 超出系统设计温度范围

**阀门管件:** 储罐预冷喷头的工作压力需在 200kPag 以上, 在 200kPag 的预冷操作压力下, LN<sub>2</sub> 的饱和温度为 -185.1℃; 某二期工程建设的 6 座 LNG 储罐的预冷管线以及相关阀门的设计最低温度为 -165℃, 不具备承受 -185.1℃ 低温的能力。所以采用 LN<sub>2</sub> 预冷, 在预冷过程中温度极有可能超出管道材料的极限, 需要对管道及阀门的受力进行重新计算, 核实是否需要对现有的阀门、管件及管道支架更换, 避免在投产过程中出现超出设计极限作业的现象。

**储罐本体:** 某 LNG 二期 6 座 LNG 储罐本体结构的设计温度为 -168℃, 如果采用 LNG 进行预冷, 即使在预冷作业过程中出现液态 LNG 积聚现象, 局部温度也不会低于 -165℃, 会一直保持在储罐内罐设计温度范围内, 不会对内部罐结构产生破坏性影响。

如果采用 LN<sub>2</sub> 预冷, 预冷过程中极有可能出现液滴, 由于 LNG 储罐是常压储罐, 会造成储罐内部局部温度最低达到 -196℃ (纯 LN<sub>2</sub> 沸点), 远低于内罐结构的设计温度。在预冷作业过程中, 操作人员需精细

操作,严格控制预冷温度,避免出现液滴或 $\text{LN}_2$ 积聚现象,这对预冷作业过程中的控制精度要求极高,操作难度较大。另外,操作人员作业过程中无法从仪表中及时判断是否有液滴出现,储罐损坏后也不能被及时发现,对内罐结构造成的不可逆的损伤也无法判断,使预冷过程及投产完成后的生产运行也存在极大的安全风险。

### 1.2.1.2 储罐预冷喷嘴能力不足

在LNG储罐预冷过程中,冷量的主要来源是预冷介质在储罐内转换为同温度气体时所需要的气化热,即预冷量主要来源为气化潜热。

LNG储罐预冷所需的这两种介质种,LNG气的气化潜热值远高于 $\text{LN}_2$ 的气化潜热值(200kPag下,LNG气化潜热为483-662kJ/kg, $\text{LN}_2$ 气化潜热为184kJ/kg),预冷过程中使用同等冷量所需的 $\text{LN}_2$ 的用量将是LNG用量的近3倍,即保证相同预冷时间及预冷速度的情况下,喷头喷射 $\text{LN}_2$ 的流量应达到喷射LNG流量的3倍,才能满足同样的预冷速度及预冷时间。

而与LNG储罐喷嘴厂家沟通后,厂家反馈当预冷介质由LNG改为 $\text{LN}_2$ 后,其喷嘴的可通过流量(流通能力)将比使用LNG降低,即在不更换预冷喷头的情况下,采用 $\text{LN}_2$ 预冷,喷嘴的喷淋流量无法满足预冷所需流量要求,不能将LNG储罐直接冷却至可进行LNG填充的目标温度(-150℃以下)。

### 1.2.1.3 卸料系统需进行改造

某LNG二期LNG储罐的6寸预冷管线由罐下平台36寸卸料支管的紧急切断阀上游引出,即上游直接与卸料总管连通,下游经罐顶预冷流量调节阀后进入储罐内预冷喷淋管线。

如果选择采用 $\text{LN}_2$ 进行储罐的预冷作业,则需要对现有的预冷流程进行改造,在预冷管线上增设必要的隔离措施及 $\text{LN}_2$ 临时注入口,防止预冷过程中或预冷完成后 $\text{LN}_2$ 进入卸料总管。同时,如果采用 $\text{LN}_2$ 预冷储罐,待预冷至一定温度后,内部温度将难以继续降低,这样就需要重新将预冷介质更换为LNG继续对储罐进行喷淋预冷才能最终达到储罐预冷的目标温度,在预冷介质切换的过程中,需要对6寸的预冷管线进行吹扫置换操作,才能切换至LNG预冷喷淋流程。吹扫置换过程涉及6寸预冷管线罐上至罐下全段管线,通过关闭其罐上及罐下隔离手阀,由中间进行常温氮气注入及排放操作,待管道复温至一定温度且管道露点及氧含量合格的情况下切换至LNG喷淋流程,上述操作会直接影响预冷作业的连续性,造成储罐无冷量输入而回温,延长预冷时间,影响预冷效果,还有可能带来部分未知的风险。

综上所述,根据现有的设计情况及现场实际情况,LNG储罐系统不能满足采用临时外接 $\text{LN}_2$ 预冷的方法进行LNG储罐预冷的条件。

## 1.2.2 操作实施风险

### 1.2.2.1 $\text{LN}_2$ 槽车资源、临时管线布置、 $\text{LN}_2$ 槽车调度、操作问题

LNG储罐预冷所需要的冷量极大,实际操作过程中需大量具有相应的 $\text{LN}_2$ 产品及槽车的资源,预冷过程一旦中断,将发生回温。 $\text{LN}_2$ 资源方面某及周边液化空气产品厂家无法独立完成 $\text{LN}_2$ 产品及槽车资源供给,需跨省调配,调配难度较大。

预冷现场需多辆 $\text{LN}_2$ 槽车同时停靠,为保证 $\text{LN}_2$ 连续不间断供应,需要对槽车现场布置、行车路线等做进一步的分析论证,确保满足某LNG接收站现场安全管理要求;

此外,在整个预冷过程中需要不断的进行槽车切换,存在预冷中断和供液压力不稳定的问题,极有可能发生不满足储罐预冷喷头的工作条件而导致液滴直接滴落至储罐罐底的风险。

### 1.2.2.2 $\text{LN}_2$ 预冷储罐技术相对不够完善

根据各地调研情况,目前仅个别小型LNG储罐采用过 $\text{LN}_2$ 预冷方式,具体调研项目情况如下:

四川广安1座20000 $\text{m}^3$ 的LNG储罐:首先采用 $\text{LN}_2$ 预冷至约-65℃,随后再用LNG预冷。

湖北黄冈2座30000 $\text{m}^3$ 的LNG储罐:首先采用 $\text{LN}_2$ 预冷至约-65℃,随后再用LNG预冷。

西安液化项目50000 $\text{m}^3$ 的LNG储罐:前期采用 $\text{LN}_2$ 喷淋预冷,温降速率约为1.2~1.5℃/h;预冷至-90℃时,温度很难继续下降,为继续降低温度,该项目采取了通过上进液管道直接注入 $\text{LN}_2$ 的高风险操作,造成储罐降温速度不可控,超过了规范要求的5℃/h限制,将储罐预冷至-120℃后引LNG进入储罐,对LNG储罐进行继续预冷和填充。

### 1.2.2.3 标准符合性

目前各LNG接收站设计标准、储罐预冷相关标准规范中,基本采用LNG喷淋预冷,因为此种预冷方式操作控制过程明确清晰,操作方法便于执行,操作模式安全平稳。如果采用 $\text{LN}_2$ 进行储罐预冷,过程中的各种技术指标不明确,操作方法不成熟,操作模式安全性有待探究,出现问题后,分析过程中难以区分是于操作原因还是施工建造原因造成的。

同时,采用 $\text{LN}_2$ 对储罐进行喷淋预冷后,储罐中会留有大量的低温氮气,后续继续进行预冷时,存在多种不确定因素造成局部低温而引起氮气液化后损害储罐的风险。

在英标 BSEN14620 及 BS-7777-1-1993、美标 API-625 中 10.4.6 及 GB/T-26978 中均明确指出过在储罐存在惰性气体的状态下若直接预冷，则可能引发局部低温，产生低于钢质储罐的设计温度的风险。其建议是对于存在惰性气体的储罐，首先采用常温的产品气（LNG 储罐即 BOG）来进行惰性气体的置换。

本方案考虑采用 LN<sub>2</sub> 对储罐进行预冷，将储罐预冷至较低温度后，将不具备采取使用常温 BOG 置换氮气的条件，否则将造成储罐冷热交替引发风险；而若直接接着采用低温 LNG 进行深冷，则有可能出现局部氮气冷凝问题，所带来的风险将更大。

## 2 LNG 储罐 LNG 预冷方案说明

### 2.1 方案简述

采用已投产运行区域的 LNG 储罐内或 LNG 船舶提供的 LNG 作为预冷介质进行 LNG 储罐预冷。如果利用 LNG 船舶内的 LNG 作为预冷介质，则需要与 LNG 船沟通，保持稳定的卸料总管压力，为储罐预冷提供稳定的介质供应；如果利用已投产 LNG 储罐内的 LNG 进行预冷，则需要利用低压外输管道与卸料管道跨接进行卸料管线压力控制，储罐预冷能有稳定的预冷介质；上述两个方案，待卸料总管压力稳定后，即可进行下一步 LNG 储罐预冷操作。

储罐预冷操作过程中，储罐的 6 寸预冷管线由罐下 36 寸卸料支管的紧急切断阀上游引出，其上游直接与卸料总管连通，下游经罐顶预冷流量调节阀后进入储罐内预冷喷淋管线，最终 LNG 由储罐内预冷喷淋管线的喷头喷出，进行储罐预冷作业。

### 2.2 可行性与优点分析

#### 2.2.1 现有系统适配性

某 LNG 二期项目按照相关规范开展设计，LNG 储罐配备了独立的预冷储罐管线，可进行通过远程控

制流量调节流量，罐内配备了流通能力为 120m<sup>3</sup>/h 的预冷喷头，可满足 220000m<sup>3</sup> 全容式储罐预冷需求。

#### 2.2.2 操作实施风险

##### 2.2.2.1 LNG 预冷稳定

LNG 储罐预冷过程中需要的冷量极大，且要求持续、稳定的预冷介质供应。采用 LNG 预冷，储罐预冷前卸料管线中存有的大量、压力稳定的 LNG 介质，具有可靠的冷量来源。其他储罐已存有足够量的投产使用 LNG，无需在预冷时连续调度车辆。

此外，预冷管线、阀门为焊接连接，无需增设临时注入点，减小了泄漏风险，无需新增隔离管件。在操作过程中，LNG 介质以连续、稳定的流量，流经封闭的管道、阀门进入储罐预冷喷头，操作简单，安全性高。

##### 2.2.2.2 LNG 预冷储罐技术完善

根据调研，目前仅涉及到个别小型 LNG 储罐采用过 LN<sub>2</sub> 预冷方式，大型 LNG 接收站的 100000m<sup>3</sup> 以上的储罐均采用 LNG 预冷方式进行。

##### 2.2.2.3 标准符合性

目前相关 LNG 接收站设计标准、储罐预冷相关规范标准中均采用 LNG 喷淋预冷，操作控制明确清晰，便于执行，安全性高。

预冷过程中不存在英标 BSEN14620 及 BS-7777-1-1993、美标 API-625 中 10.4.6 及 GB/T-26978 明确指出过的在储罐存在惰性气体的状态下若直接预冷，则可能引发局部低温，产生低于钢质储罐的设计温度的风险问题。（标准建议是对于存在惰性气体的储罐，首先采用常温的产品气（LNG 储罐即 BOG）来进行惰性气体的置换）

## 3 LN<sub>2</sub> 与 LNG 技术方案对比分析表

综合 LN<sub>2</sub> 与 LNG 预冷方案，形成对比表 1，分析

表 1 LN<sub>2</sub> 与 LNG 预冷方案对比表

序号	对比项	方案一：LNG 预冷	方案二：LN <sub>2</sub> 预冷
1	现有系统适配性	满足现有设计温度范围： ①系统（管件、阀门、储罐本体）设计温度范围内操作； ②储罐预冷喷嘴能力满足； ③卸料系统无需进行改造，不增加泄漏风险点。	超出系统设计温度范围： ①超出系统（管件、阀门、储罐本体）设计温度范围； ②储罐预冷喷嘴能力有限； ③预冷系统需进行改造。
		操作实施风险： ①具有可靠、稳定的冷量来源，是焊接连接的封闭系统； ② LNG 预冷储罐技术完善且经验丰富。	操作实施风险： ① LN <sub>2</sub> 槽车资源、临时管线布置、LN <sub>2</sub> 槽车调度等，操作难度增加； ② LN <sub>2</sub> 预冷储罐技术相对不够完善，目前仅地方企业小型储罐有应用，应用效果不良。
		标准符合性： ①采用 LNG 喷淋预冷，标准规范中操作控制明确清晰，便于执行； ②预冷过程中不存在置换惰性气体操作，较少局部低温风险。	标准符合性： ①采用 LN <sub>2</sub> 预冷相关技术指标不明确，出现问题后难以界定操作和施工原因； ②标准中明确惰性气体环境预冷存在风险，应先置换为同一介质，如 LN <sub>2</sub> 预冷可能引发局部低温。
2	预冷量	预估 2500t LNG（至少 50% 可回收）	7500t LN <sub>2</sub> （预冷不到位可能会需要重新使用 LNG 预冷）
3	安全性	安全性高，符合现有设计规定	安全性较低，需要严格控制预冷温度，确保不低于设计温度

各方案优缺点如表 1。

#### 4 结论及建议

通过对比,某 LNG 二期项目的 6 座储罐现有设计不能满足采用临时外接  $\text{LN}_2$  进行 LNG 储罐预冷的条件,且预冷过程存在风险。预冷 1 座  $220000\text{m}^3$  LNG 储罐的 LNG 用量约为 2500t,本项目属于已建工程的扩建项目,可通过已有 BOG 处理设施实现部分的 BOG 回收(预估在 50% 以上)。

对现有设计进行改造后,可满足使用  $\text{LN}_2$  预冷储罐的技术路线,预估单座  $220000\text{m}^3$  LNG 储罐所需的  $\text{LN}_2$  量约为 7500t,但极有可能出现无法达到预冷目标温度,过程中再吹扫置换,合格后重新更换为 LNG 预冷的情况。实施过程中同时产生额外的物资采购费用以及槽车、人员调度等支出,不仅增加了泄漏风险点,还极大的增加了操作和运行风险。

综合安全及经济因素,并考虑到 LNG 储罐安全平稳的预冷投产需要成熟的技术、合理的现场调度等多方面支撑,本项目采用常规成熟的做法来进行 LNG 储罐的预冷作业,秉承与设计阶段理念一致的思路,采用 LNG 进行 LNG 储罐的预冷,不采用  $\text{LN}_2$  进行 LNG

储罐的预冷。

#### 参考文献:

- [1] 金滔,卢太古,汤珂,等.低温乙烯储罐置换预冷方案的分析与比较[C].中国动力工程学会工业气体专业委员会 2009 年技术论坛论文集,2009.
- [2] 张宏志,盛选禹,黄靖,等.LNG 低温管道预冷工艺数值模拟[J].机械工程与技术,2016,5(3):272-277.
- [3] 彭明,丁乙.全容式 LNG 储罐绝热性能及保冷系统研究[J].天然气工业,2012(3).
- [4] 王武昌,李玉星,孙法峰,臧垒垒.大型 LNG 储罐内压力及蒸发率的影响因素分析[J].天然气工业,2010(7).
- [5] 曹文胜,鲁雪生,顾安忠,林文胜,石玉美.液化天然气接收终端及其相关技术[J].天然气工业,2006(1).
- [6] 初燕群,陈文煜,牛军锋,刘新凌.液化天然气接收站应用技术(I)[J].天然气工业,2007(1).

#### 作者简介:

欧阳虎(1986-),男,汉族,天津人,大学本科,中级工程师,从事 LNG 接收站运行管理工作。

