

# LNG低温管道预冷数值模拟与预冷新工艺

宋蒲阳 林海威

西安秦华燃气集团有限公司 陕西西安 710075

**摘要:** 针对LNG场站低温LNG外输管道预冷方式进行了分析,找出以往预冷工艺中所存在的弊端问题,优化了LNG外输管道预冷工艺,采用FLUENT软件对DN100与DN200的不锈钢管道过渡段进行数值分析,研究并分析出BOG气体预冷管道的温度变化趋势,以及低温不锈钢管道在预冷过程中的实时温度显示,得出BOG气体预冷不锈钢低温管道的规律,从而设计得出LNG外输管道预冷的新工艺。

**关键词:** LNG、BOG、低温管道、预冷、数值模拟

## 1 前言

LNG场站在运行中,管道设备的预冷是一项尤为重要的关键工作。投运前必须对LNG储罐及相关设备管道按照规范进行充分预冷,须严格控制储罐主容器各位置温度下降的速率,同时需记录预冷管道支架的位移量,这样的工作是为了消除储罐在正式投产进液而产生的热应力。LNG场站投产之后,在储罐进出液之前同样需要对设备及管道进行预冷,此时管道的应力变化会随着使用次数越来越小,但是使用前的预冷工作是必不可少的。本文针对LNG应急调峰站,对LNG气化外输前管道的预冷工作中存在的问题及工艺改造进行探究。

## 2 LNG全容罐相关管道预冷工艺与步骤

### 2.1 主要工艺流程

国内某座LNG应急调峰站建有2座LNG子母罐(工作压力0.45MPa)、1座LNG全容罐(工作压力15KPa-18KPa)、3套LNG装卸车泵橇、4台BOG工艺往复式压缩机、LNG气化系统等附属设备。

在LNG应急调峰站气化外输工作中,启动潜液泵加压外输液化天然气前,须先对LNG外输相关的管道进行预冷,相关的管道为泵后回流管道及出液管道。

2.1.1 首先要对泵后回流管道进行预冷,待预冷完成后启动LNG储罐内潜液泵,液化天然气经过泵后回流管道返回储罐;

2.1.2 由于泵后回流管道和出液管道是连通的,利用泵后回流产生的小流量对下游出液管道进行预冷。

LNG全容罐出液管道预冷工艺流程见图1

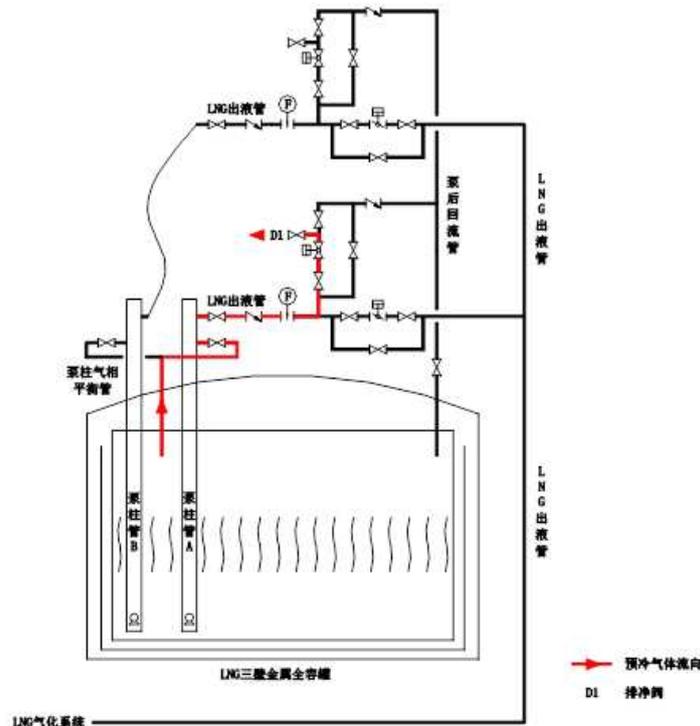


图1 LNG全容罐出液管道预冷工艺流程

## 2.2 LNG气化外输前的预冷操作

以LNG应急调峰站LNG全容罐A#泵运行为例,对LNG全容罐出液管道预冷进行介绍,本节主要研究BOG气体对管道预冷的运行模式。

泵后回流管道预冷操作如下:

泵后回流管道与LNG出液管道是连通的,在正式对出液管道进行预冷之前,首先预冷泵后回流管道,也就是外输管道出口至泵后回流管道。这段管段在日常运行中,处于接近常温状态,需要采用低温介质对其进行预冷,如果在这个过程中直接启动潜液泵出液对泵后回流管道预冷,是不可取的。泵的额定功率抽出的液化天然气流量仍无法平稳满足预冷的需求。通常的操作方法是:

a.使泵后回流管道与出液管道畅通;

b.打开阀门D1,使储罐内部的低温BOG气体经过泵柱气相平衡管、泵柱管、出液管,从阀门D1的出口向外排放。

此方法是为了使预冷的管道形成介质流动通路,用储罐内部的低温BOG气体与管道壁进行换热,使BOG气体的温度升高,从而对泵出口至泵后回流管道进行逐步预冷,由于持续的低温气体排出,待排净阀D1阀体结霜,检测阀门表面温度为 $-120^{\circ}\text{C}$ 时,说明管道满足预冷标准。

## 3 预冷方式存在的问题与解决途径

### 3.1 问题所在

上述的方式是同类LNG储罐较为常见的管道预冷方式,在预冷的过程中,BOG需持续向外排放,经预冷过程记录,需持续排放6个小时,根据流体动力学计算出管道流速及BOG排放量,运用连续性方程、伯努利方程。

经计算得出BOG排放量约为 $5000\text{Nm}^3$ 。

国内同类LNG储罐在实际情况中,多处于LNG液化厂,在日常运行中LNG的外输采用装车外输,由于LNG液化厂的运行间歇时间较短,通常LNG出液管道一直处于低温状态,在这种运行工况中,LNG出液管道预冷完成之后在长时间的运行过程中,将不会再进行预冷。

近几年随着城市的不断发展,燃气企业也担负着保障民生、促进生产的重任,燃气的应急储配也成为政府与燃气企业的重点建设工作,LNG应急调峰站为兴建项目,LNG气化外输主要是为了在城市燃气管网压力较低时,补充天然气管网缺口为管网补压,在这种运行模式下,LNG气化外输是没有固定周期的,甚至气化外输的启停周期较长。

针对这种运行模式,LNG气化外输工作间隔时间较长,气化外输相关管道必然会以管道保温层与空气热传导而复温,在进行下一次的LNG气化外输工作时必须重新对气化外输相关管道进行预冷。经过上述计算每次BOG气体预冷泵后回流管道需要消耗 $5000\text{Nm}^3$ BOG气体,并且在预冷过程中,BOG气体排往大气无法回收,造成运行成本的浪费,这种预冷方式在储罐顶对大气排放,存在很高的安

全风险。

以上问题就是目前国内主要LNG应急调峰站气化外输管道预冷难以攻克的难题。根据对国内某座LNG应急调峰站工艺配套进行分析,寻求LNG气化外输管道预冷的解决办法。

### 3.2 解决途径

解决途径是找到可回收且预冷安全程度高的预冷介质,通过对该场站LNG全容罐工艺系统的深入研究,LNG全容罐内部BOG气体在预冷管道过程中,除了对外排放以外无法回收。为此只能在LNG全容罐系统以外寻找解决方案,纵观整个该场站,上述提到场站建设有2座LNG子母罐,且LNG子母罐与LNG全容罐相关工艺系统是相互衔接联通的,其中两套LNG储罐系统的LNG外输管道是连通了,这样可以将LNG子母罐内的LNG注入两套LNG储罐的外输连通管内,由于LNG子母罐运行压力为 $0.45\text{MPa}$ ,从而经连通管自流入LNG全容罐外输管道对管道进行降温预冷。这样的方式相当于LNG子母罐与LNG全容罐进行倒液,对整个过程进行了评估,存在以下弊端:

3.2.1 倒液前首先要对LNG子母罐的出液管道进行预冷,相当于增加了一项额外的预冷工作;

3.2.2 在倒液过程中,LNG子母罐的罐压将下降,需要对储罐进行增压;

3.2.3 运用倒液的方式不满足经济效益;

3.2.4 倒液过程增加了LNG的运行范围,从而增加了一定的运行风险。

综合以上因素,采用LNG子母罐对LNG全容罐进行倒液的方式是不够周全的,甚至是不可取的。在研究过程当中需要重新寻找管道的预冷介质,把预冷介质的选择重新转移至以往管道预冷方式的介质—BOG气体。由于LNG子母罐的工作压力为 $0.45\text{MPa}$ ,罐压是由气相决定的,在LNG子母罐工艺系统中,为了维持储罐的工作压力, $0.45\text{MPa}$ 的BOG气体需要经过加热排放至城市中压管网,这部分气体对研究提供了方向和思路,如何把LNG子母罐内的BOG气体作为LNG全容罐气化外输相关管道的预冷气源,作为本文的核心论述。

根据对工艺流程以及现场工艺管道的布置情况进行了研究,LNG子母罐的BOG管道接通到两套LNG储罐外输管道联通管的方案是可行的,并且现场的工艺改造量不大,在初步实施中,首先对工艺管道进行优化改造设计,LNG子母罐BOG气体为LNG全容罐出液管道预冷工艺流程见图2。

采用建立物理模型对整个流程进行梳理,本文拟利用ANSYS中的FLUENT软件,建立数值计算模型,模拟BOG气体预冷管道过程中管内的流动过程,研究预冷过程中温度与时间的变化特征趋势。

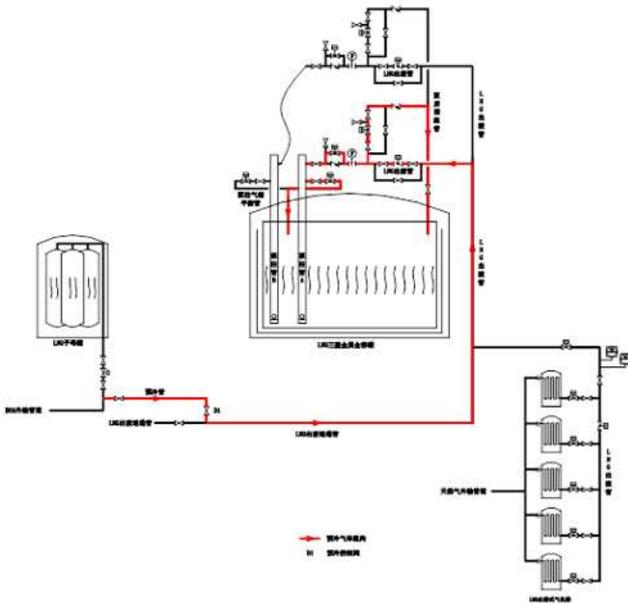


图2 LNG子母罐BOG气体为LNG全容罐出液管道预冷工艺流程

### 3.3 物理模型

LNG子母罐内0.45MPa的BOG气体通过两套LNG储罐外输联通管道,进入LNG全容罐出液管道,分2部分各经过泵柱管、泵柱气相平衡总管道及泵后回流总管道进入到储罐。同时对LNG外输相关的出液管道及泵后回流管道进行预冷,计算起点为LNG子母罐内顶部的BOG管道(规格: D108×4),泵后回流总管道(规格: D159×6)及泵柱气相平衡总管道(规格: D57×3.5)为计算终点。LNG子母罐内的BOG气体经过下降段、水平段、弯头、爬升段流入LNG全容罐。BOG气体的流动总管道长约200米。

BOG气体的温度为-120℃,BOG气体与管道壁进行换热,使BOG气体的温度升高,同时对管道进行降温,保温层与大气环境进行自然对流换热。图3为BOG管道流向示意图。

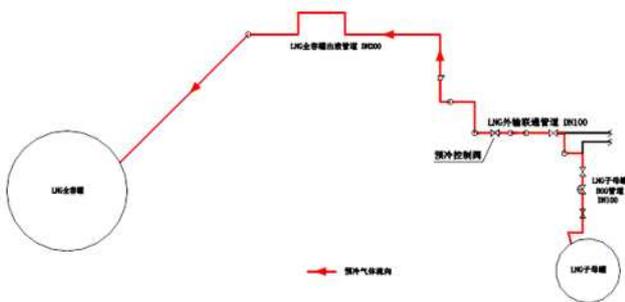


图3 BOG管道流向示意图

本文选取研究管道为DN100-DN200的过渡段不锈钢管道,长度8米,管道的材质为06cr19Ni10,外部保温层为PIR(聚异氰尿酸酯)厚度为150mm。物性参数见表1。

名称	密度(kg/m <sup>3</sup> )	比热(kJ/kg·K)	运动粘度(m <sup>2</sup> /s)	导热系数W/(m·K)
BOG	1.81	2223	1.437 × 10 <sup>-5</sup>	0.03
06cr19Ni10	7860	460	/	11.8
PIR	80	358.7	/	0.019

### 3.4 数学模型

选取DN100与DN200的过渡段,总管长为8m的水平直管段为研究对象。管道结构简化为由不锈钢管和保冷层组成,采用BOG作为预冷气体,使LNG子母罐压力为0.45MPa的BOG气体通入LNG出液管道,通过BOG气体与管道壁面换热,使BOG气体的温度升高,进而实现对管道的预冷,管道预冷到达一定程度时将冷量传递给内保温层,此后,通过外保温层与大气环境的对流换热,使得管道外保温层的温度逐渐降低。由于低温管道的实际预冷过程较复杂,因而为方便研究,首先需要对模型进行简化:

- (1)忽略管壁轴向导热,仅考虑管壁径向导热;
- (2)不考虑管道外壁与保冷层之间的接触热阻;
- (3)管壁和保冷材料的热容、热导率等物性不随温度变化。

在以上简化假设的基础上,该模型满足连续性方程、动量方程和能量方程。

首先,基于ANSYS SCD进行几何建模,Fluent Meshing剖分多面体ploy网格,网格数量82450,正交质量在0.3以上。图4为DN100与DN200的过渡段模型。

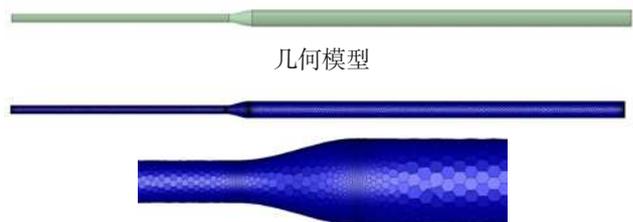
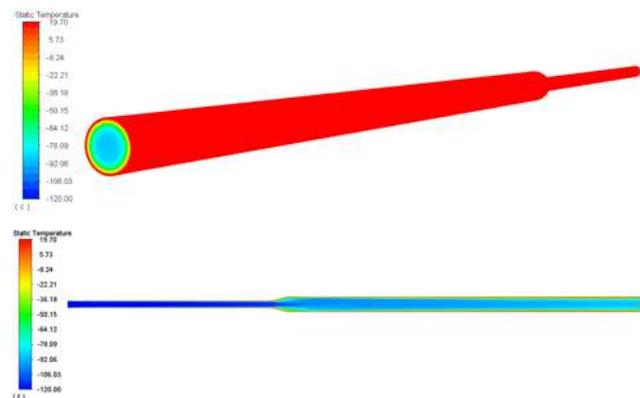


图4

### 3.5 数值模拟结果与分析

模拟BOG气体流入选取DN100-DN200的过渡段不锈钢管道,根据液化天然气低温管道设计规范规定,管道预冷的温降控制在10℃/h。在预冷过程中,入口的流速可通过手动低温截止阀的开度来控制。模拟计算选用速率为2m/s,温度为-120℃的BOG气体注入8m长的过渡段管道中,设置时间步长为60s,经过软件模拟计算,图5为管道预冷30分钟的温度分布云图。



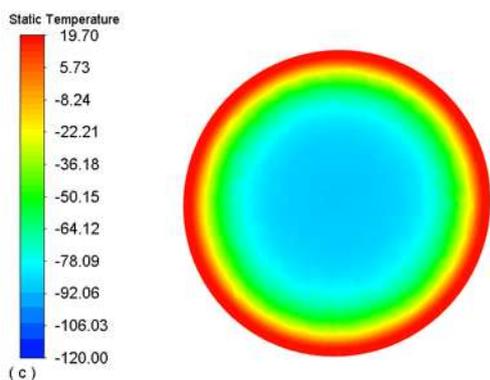


图5

当BOG气体以2m/s的流速进入管道对其进行预冷,对预冷过程进行数值模拟得出预冷10h过程的管道壁面的温降曲线,如下图6所示:

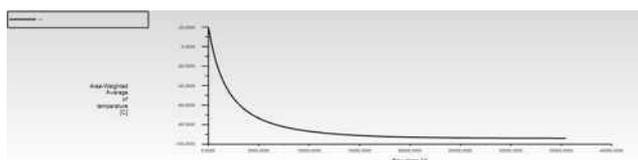


图6

从上图可以看出,BOG气体预冷管道的趋势呈先快后慢,最后趋于平缓。在预冷进行的1个小时内,温降速率最大,6个小时后温降很慢接近平缓。刚开始的时候温降速率过快的原因是BOG气体温度与管道温差过大,对流换热系数较大,温降速率过快,在运行过程中应着重关注预冷刚开始的阶段。通过10小时的预冷过程模拟,管道的温降速率控制在10°C/h,满足管道预冷速率要求。

在预冷过程中,BOG气体通过管道使管道避免温度降低,部分冷量会传递给管道的外保温层,由于外保温层与大气环境之间存在对流换热,因此外保温层的温度会有小幅度的降低,图7为管道预冷10小时后的温度分布云图。

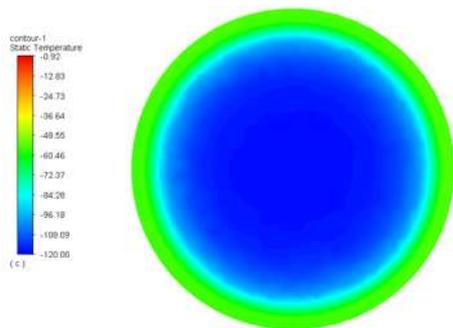


图7

#### 4 预冷新工艺

通过对BOG气体预冷不锈钢管道的数值模拟分析,结合LNG子母罐BOG管道与LNG外输管道的连通工艺,这种工艺优化是可以解决LNG外输管道的预冷问题,避免以往遇冷方式BOG气体的向大气外排放,借此研究过程,重新对LNG场站工艺系统进行探讨研究。除了此次研究的LNG场

站以外,常压LNG储罐与带压LNG储罐的组合形式在国内少之又少。所以,在设计阶段设计出全新的预冷工艺是一项重要的工作。

本文针对BOG气体作为不锈钢管道的预冷气源进行了研究并得出可行结论,在LNG液化工厂中,BOG气体可在冷凝液化,前文提到液化工厂的间歇周期很短,管道一直处于冷态。在LNG应急调峰站中,BOG气体需要加热升压外输至燃气管网,所以针对LNG应急调峰站的工艺设计中,需要对BOG气体与LNG外输管道进行优化,寻找BOG气体作为LNG外输管道预冷气源的新方式。同时探究了国内多家设计院关于LNG应急调峰站的工艺设计,BOG气体要在LNG外输管道内流通,BOG气体就必须经过LNG外输管道,前文有提到,BOG气体可通过泵柱气相平衡管道进入泵柱管及LNG外输管道,若想形成流体通路,BOG气体前后就必须具有压差,所以可将LNG外输管道末端进行升压可使BOG气体形成通路对管道进行降温。

LNG外输管道下游是LNG气化系统,LNG气化系统是不能够提供升压力的,外输的压力来源是罐内或者罐外LNG低温泵所提供的,前文有提到,LNG外输前是不能启泵的。通过对每个工艺节点的研究发现,BOG压缩机可将BOG气体从外输管道抽出并升压,需要对LNG外输管道进行工艺优化完善,将其支管连通至BOG压缩机。为此,新的预冷工艺得以诞生。图8为新的预冷工艺流程图。



图8 新的预冷工艺流程图

选用合适的BOG压缩机是工艺优化的前提,结合预冷工况的需求,在预冷过程中,需要结合压缩机的入口压力,随着预冷速率的过程压缩机需要进行自身流量调节。通过对BOG压缩机的结构形式进行调研,螺杆式压缩机可满足新的预冷模式。此机型的特点如下:

螺杆式压缩机一般都会配有滑阀装置,可以在15%-100%范围内调节流量,无极调节,并且随着滑阀的调节,机组轴功率也会有对应的下降,所以是一种比较节能的流量调节方式。螺杆机易损件只有机械密封、轴承,相对比往复式压缩机要小得多,一般连续运转时间可以不低于2年。螺杆机入口工况范围比较宽,在相当大的波动范围内都能稳定运行,最低入口压力可以达到负压。无极调节、节能、运行稳定是满足新预冷模式的三项优势。

## 5 结论

本文采用FLUENT软件对LNG低温不锈钢管道预冷过程进行了数值模拟, 经过计算并分析了DN100与DN200过渡段长度8m的管道在预冷过程中管道温度与时间的变化趋势, 分析得出BOG气体预冷LNG管道的可行性, 从而对BOG管道与LNG外输管道相连通进行了工艺优化, LNG外输管道兼做预冷管线, 避免传统预冷方式对外排放BOG的危害与低效率。通过一系列的分析, 研究得出适用于LNG应急调峰站LNG外输管道的全新预冷模式, 对全新工艺的控制及连锁点进行了系统优化, 可满足在LNG外输管道预冷工作中安全、高效、经济的运行。

## 6 参考文献

- [1] 液化天然气低温管道设计规范GB/T51257-2017;
- [2] 卢超, 嵩锐, 易冲冲, 王文, 吕俊, 王蕾. BOG 气体对 LNG 输送管道预冷过程的数值模拟[J]. 低温工程, 2012(6): 51-56;
- [3] 张宏志, 盛选禹, 黄靖, 舒均满, 徐雅晨. LNG低温管道预冷及热应力分析[J]. 建模与仿真, 2017, 6(1): 21-30;
- [4] 严俊伟, 李兆慈, 赵多. LNG 低温管道预冷过程数值模拟[J]. 低温与超导, 2014(9): 10-14。