

Numerical Simulation on the Pre-Cooling Process of the LNG Low-Temperature Pipe

Hongzhi Zhang¹, Xuanyu Sheng², Jing Huang¹, Junman Shu¹, Yachen Xu³

¹Installation Company of Daqing Oilfield Engineering Construction Co., Ltd., Daqing Heilongjiang

²Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing

³Research Center of Advanced Energy Equipment Technology, Tianjin Research Institute for Advanced Equipment, Tsinghua University, Tianjin

Email: xuanyu@tsinghua.edu.cn, shengxy@tsinghua-tj.org

Received: Sep. 8th, 2016; accepted: Sep. 27th, 2016; published: Sep. 30th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

LNG low-temperature pipe pre-cooling is difficult point of completion and commissioning of LNG project. Under the flow rate of 0.2 m/s, 0.5 m/s and 1 m/s, FLUENT software is used to conduct simulation of BOG gas pre-cooling technology for $\Phi 630 \times 10$ mm low-temperature pipe to obtain temperature change regularity of pipe during BOG pre-cooling process and real-time display of temperature of low-temperature pipe during pre-cooling process and to formulate pre-cooling plan of low-temperature pipe.

Keywords

LNG Low-Temperature Pipe, Pre-Cooling, Numerical Simulation

LNG低温管道预冷工艺数值模拟

张宏志¹, 盛选禹², 黄靖¹, 舒均满¹, 徐雅晨³

¹大庆油田工程建设有限公司安装公司, 黑龙江 大庆

²清华大学核能与新能源技术研究院, 北京

³清华大学天津高端装备研究院先进能源装备技术研究所, 天津

Email: xuanyu@tsinghua.edu.cn, shengxy@tsinghua-tj.org

收稿日期：2016年9月8日；录用日期：2016年9月27日；发布日期：2016年9月30日

摘要

LNG低温管道预冷是LNG工程投产试运行的难点，采用FLUENT软件对 $\Phi 630 \times 10$ mm低温管道进行BOG气体预冷工艺模拟，在0.2 m/s、0.5 m/s、1 m/s流速下，获得了BOG预冷过程的管道温度变化规律，以及低温管道在预冷过程中的实时温度显示，并制定了低温管道预冷方案。

关键词

LNG低温管道，预冷，数值模拟

1. 引言

LNG低温管道施工完成后，应对LNG管道进行预冷工艺。由于LNG是液态天然气，运行温度为 -163°C 。如果不进行预冷直接投入，不仅会产生收缩变形，而且由于冷却过快使低温管道上下表面温差产生弯曲变形及热应力破坏[1]。

预冷是确保LNG工程项目顺利投产试运行的重点工作。首先用冷的BOG气体在管路中循环，冷却必须慢慢的进行，使管路达到 $-95^{\circ}\text{C} \sim -118^{\circ}\text{C}$ 范围内，方可直接输送LNG。通过预冷使常温的LNG输送管道达到温度较低工作状态，保证了LNG低温管道的运行[2][3]。

2. 低温管道结构

以国内LNG管线为例，截取直径为 $\Phi 630 \times 10$ mm管长为5 m的水平直管段为研究对象。管道结构简化为由钢管和保冷层组成，采用BOG作为预冷气体，管道钢管选用厚度为20 mm的0Cr18Ni9，管道保冷层由两部分组成，内层为厚度为100 mm的聚异氰尿酸脂，外层为厚度为50 mm的泡沫玻璃，物性参数见表1。

3. 模型建立

将管道通入BOG气体，通过与管道壁面换热，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，通过内、外保温层之间的导热，以及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[4]-[6]：

Table 1. Physical parameters of the pipe

表 1. 管道结构物性参数

名称	密度(kg/m ³)	比热(kJ/kg·K)	运动粘度(m ² /s)	导热系数W/(m·K)
BOG	0.717	2223	1.437×10^{-5}	0.03
0Cr18Ni9	7860	460	/	11.8
聚异氰尿酸脂	80	358.7	/	0.019
泡沫玻璃	16	880	/	0.06

- 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，公式如(1)~(5)，保冷层导热微分方程如公式(6)：

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho u \vec{U}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_u - \frac{\partial p}{\partial x} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho v \vec{U}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_v - \frac{\partial p}{\partial y} \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \omega \vec{U}) = \text{div}(\mu \text{grad} \omega) + S_w - \frac{\partial p}{\partial z} \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho c_p \vec{U} T) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + S_T \tag{5}$$

保温层满足的导热微分方程为：

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho h) = \nabla \cdot (K_{\text{eff}} \nabla T) + S_h \tag{6}$$

4. 数值模拟计算结果及分析

将温度为 153 K 的 BOG 气体以 0.2 m/s 的流速注入管长为 5 m 的管道中，对管道进行预冷。设置时间步长为 60 s，每 10 min 保存一组数据，计算总时间为 12 h，初始时刻管道及环境温度均设置为 303 K，图 1 为管道预冷 10 min 时的温度分布云图。

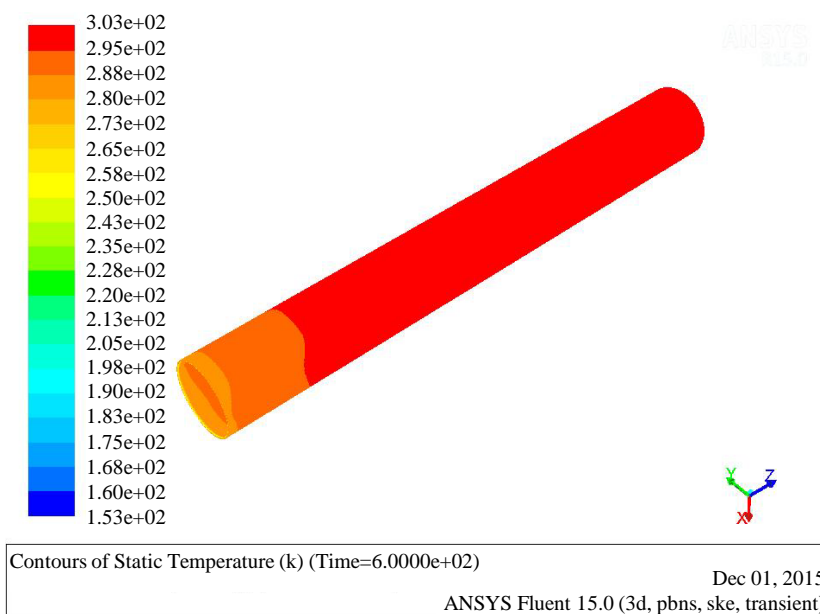


Figure 1. Temperature cloud chart of the BOG pipe after pre-cooling 10 min
 图 1. BOG 管道预冷 10 min 温度分布云图

当 BOG 气体分别以 0.2 m/s、0.5 m/s 和 1 m/s 的流速进入管道时，分别对这三种工况预冷 12 h 的管道温降情况进行数值模拟，得到管道壁面的温降曲线如图 2 所示。

从上图可以看出，三种不同流速的 BOG 管道预冷趋势，整体上均呈现先变化较快，后趋于平缓的趋势，0.2 m/s 流速时的温降曲线在前 10 小时内温度变化比较快，以后变化比较缓慢；0.5 m/s 流速时的温降曲线在前 7 小时内变化比较快，以后变化比较缓慢；流速为 1 m/s 的温降曲线在前 5 小时内变化比较快，以后变化比较缓慢，主要是由于管道入口段的 BOG 温度较低，与管道的温差较大，对流换热系数较大，于是管道温降较快。因此需先以较小速率进行预冷，然后慢慢地增加流速。

由于管道预冷过程中，管道壁面温度逐渐降低，因而到达一定温度后，会将冷量传递给管道内保温层，内保温层通过导热将温度传递给外保温层，同时由于外保温层与大气环境之间存在对流换热，因而使得外保温层的温度会有小幅度的降低，图 3 为不同流速下管道预冷 12 h 横截面温度分布云图。

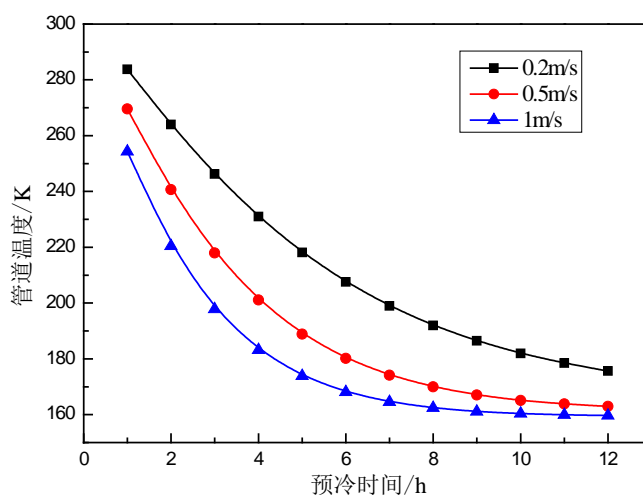
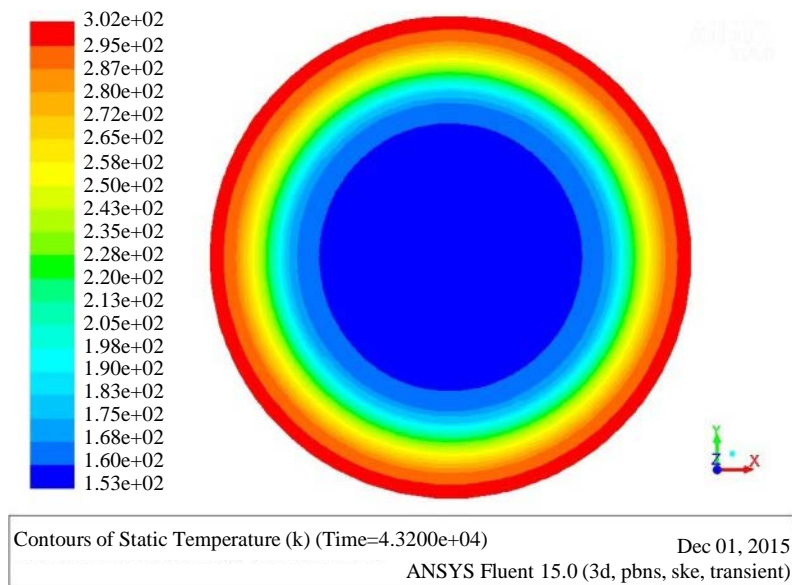


Figure 2. Temperature response of the pipe wall with pre-cooling time under the different flow rates

图 2. 不同流速下管道壁面温度随预冷时间变化曲线



(a)

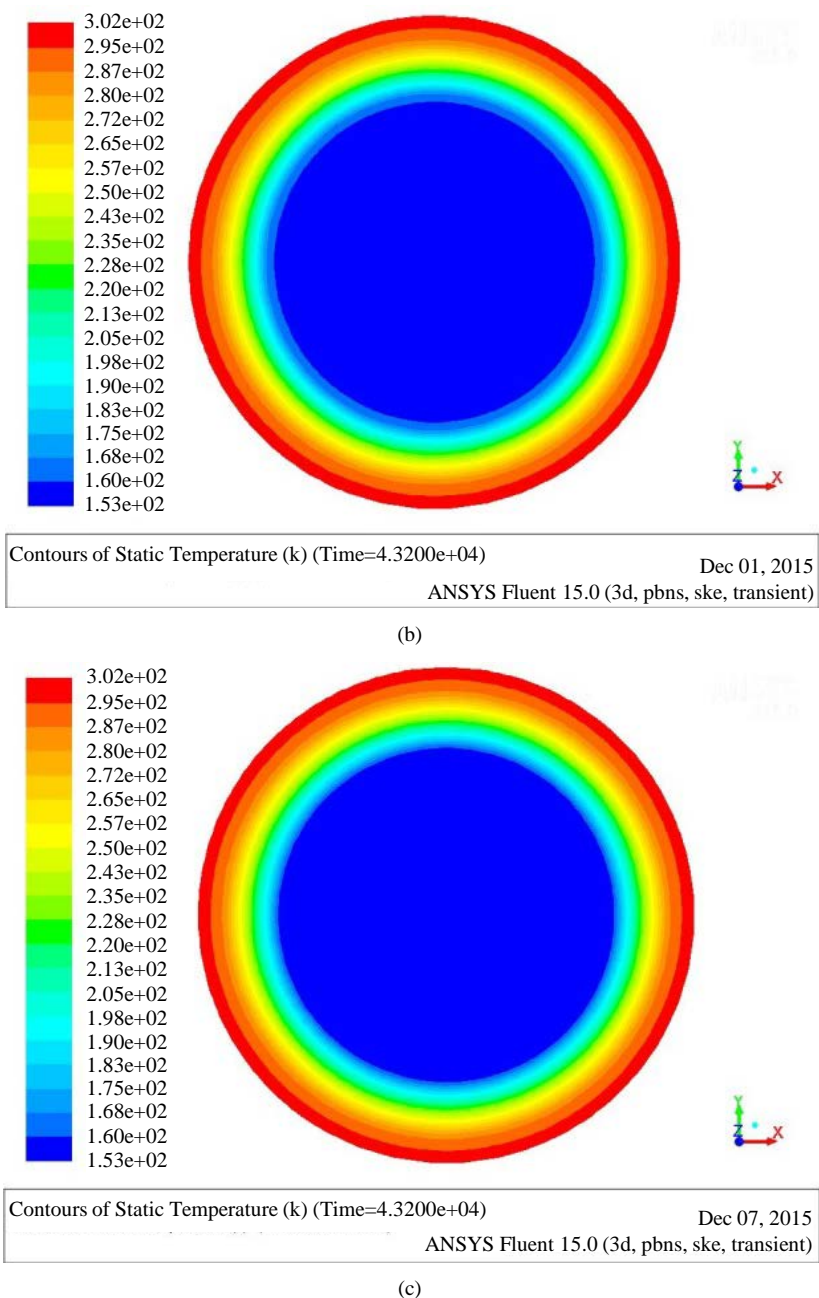


Figure 3. Temperature cloud chart of the pipe cross section after pre-cooling 12 h under the different flow rates. (a) velocity of 0.2 m/s, (b) velocity of 0.5 m/s, (c) velocity of 1 m/s

图 3. 不同流速下管道预冷 12 h 的管道横截面温度分布图。(a) 流速 0.2 m/s; (b) 流速 0.5 m/s; (c) 流速 1 m/s

5. 结论

本文采用 Fluent 软件对 LNG 管道预冷情况进行数值模拟, 计算并分析了管径为 610 mm, 管长为 5 m 的管道预冷过程的管内流动和管道的温度分布。对比分析了不同流速下预冷 12 h 内管道壁面的温度变化情况, 结果表明, 0.2 m/s、0.5 m/s 以及 1 m/s 的温降曲线变化较快的时间分别为 10 h、7 h 及 5 h, 为 LNG

低温管道预冷提供了依据。

参考文献 (References)

- [1] 华创, 张帆, 胡洪兵, 高利波, 张杰. LNG 储存技术研究现状[J]. 当代化工, 2016(6): 1267-1269.
- [2] 曹学文, 吉俊毅, 杨文. LNG 卸料管道氮气预冷温度分布规律[J]. 油气储运, 2016(3): 492-502.
- [3] 余红梅, 李兆慈, 编. 水平管道预冷过程研究[J]. 管道技术与设备, 2009(6): 16-21.
- [4] 严俊伟, 李兆慈, 编. LNG 低温管道预冷过程数值模拟[J]. 低温与超导, 2014(9): 10-14.
- [5] 卢超, 嵩锐, 易冲冲, 王文, 吕俊, 王蕾. BOG 气体对 LNG 输送管道预冷的数值模拟[J]. 低温工程, 2012(6): 51-56.
- [6] 韩力, 刘鑫鹏, 马金晶, 郭开华. 半封闭空间 LNG 泄漏安全性数值模拟研究[J]. 石油与天然气化工, 2016(3): 97-102.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: met@hanspub.org