

Analysis on the Pre-Cooling and the Thermal Stress Distribution 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: Dec. 2nd, 2016; accepted: Dec. 20th, 2016; published: Dec. 23rd, 2016

Copyright © 2017 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

The pre-cooling of LNG low-temperature pipe is a 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. The temperature data are extracted into ANSYS software to calculate the thermal-stress and to formulate the pre-cooling plan of the low temperature pipe.

Keywords

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

LNG低温管道预冷及热应力分析

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12月2日; 录用日期: 2016年12月20日; 发布日期: 2016年12月23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。导出温度数据在ANSYS软件进行热应力分析, 总结出低温管道预冷规律。

关键词

LNG低温管道, 预冷, 数值模拟

1. 引言

LNG低温管道安装完毕投入运行前, 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°C ~ -118°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. 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的聚异氰尿酸酯, 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[2], 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[3], 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, 公式如(1)~(5), 保冷层导热微分方程如公式(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

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

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

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

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

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

保温层满足的导热微分方程为:

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

4. 数值模拟计算结果及分析

根据管道预冷规范, 管道预冷温降应控制在 20 K/h, 基于此要求, 入口流速不应设置过大[4]。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。

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, 整体上都呈现先变化较快, 后趋于平缓的趋势, 且在预冷开始的 1 小时内温降速率最大, 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, 最大温降速率约为 20 K/h, 10 小时以后温度的变化逐渐趋于缓慢; 0.5 m/s 流速时的温降曲线在前 7 小时内变化比较快, 最大温降速率约为 34 K/h, 以后变化趋于缓慢; 流速为 1 m/s 的温降曲线在前 5 小时内变化比较快, 最大温降速率约为 48 K/h, 以后变化趋于缓慢, 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, 以上 3 种流速的管道预冷最大温降速率均小于 50 K/h, 符合 LNG 低温管道安全预冷速率指标。

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。

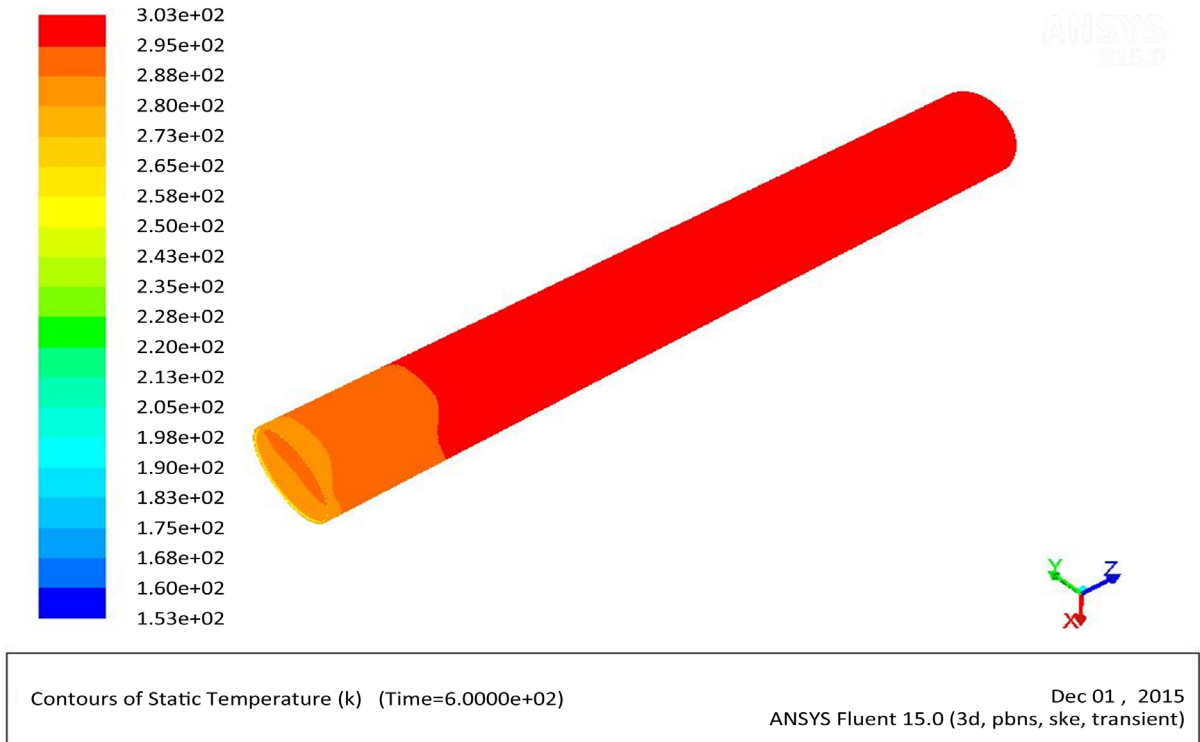


Figure 1. Temperature cloud chart of the BOG pipe after pre-cooling 10 min
图 1. BOG 管道预冷 10 min 温度分布云图

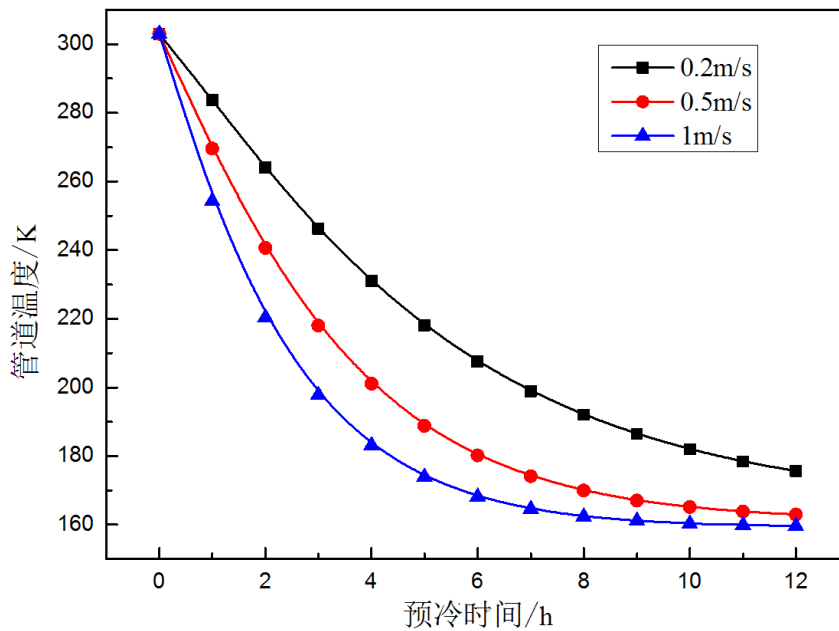
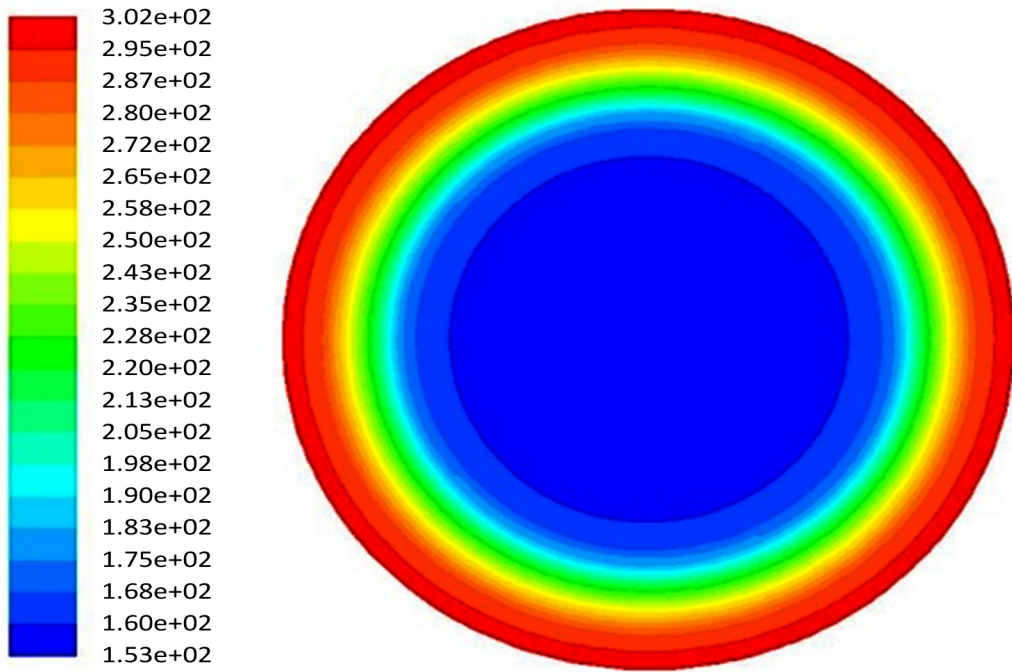


Figure 2. Temperature response of the pipe wall with pre-cooling time under the different flow rates

图 2. 不同流速下管道壁面温度随预冷时间变化曲线

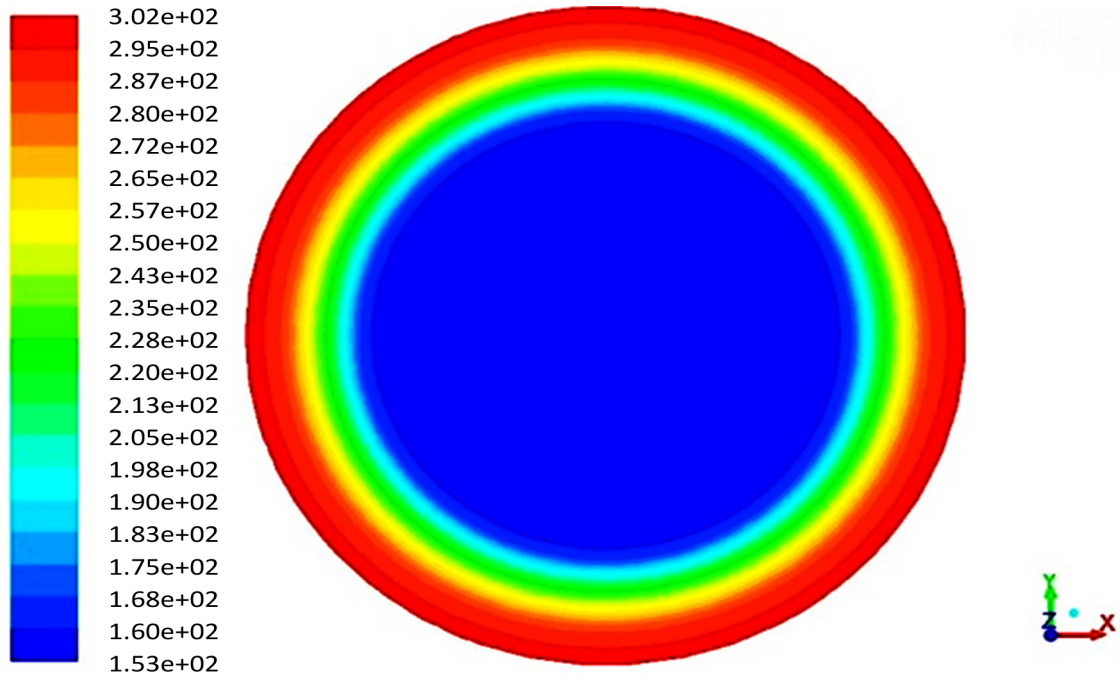
5. 预冷热应力分析

管道预冷时两端温度随时间逐渐降低，管道产生收缩变形。考虑到管道托架的安装结构，假定管道



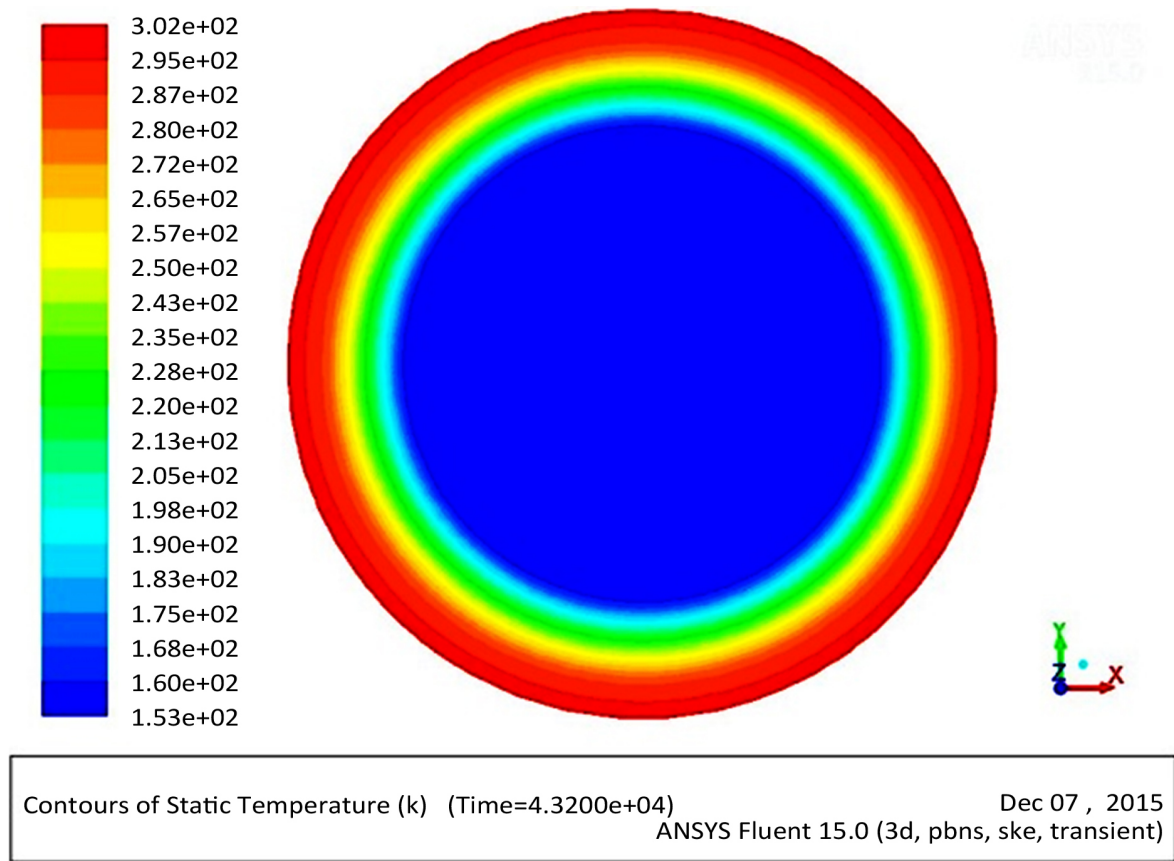
Contours of Static Temperature (k) (Time=4.3200e+04) Dec 01 , 2015
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, ske, transient)

(a) 流速 0.2 m/s



Contours of Static Temperature (k) (Time=4.3200e+04) Dec 01 , 2015
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, ske, transient)

(b) 流速 0.5 m/s



(c) 流速 1 m/s

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。流速分别为 0.2 m/s (a)、0.5 m/s (b) 和 1 m/s (c) 时管道预冷 12 h

为简支梁结构，一端固定，一端由于温度降低引起自由收缩，从而计算出管道收缩位移量。由计算结果显示，管道长度缩短与预冷温度变化、预冷流速成比例关系。温度下降越快，管道长度缩短越大；管道流速越大，管道长度缩短越大。由于管道长度缩短，管道两端没有约束，因此，产生的热应力特别小。

导出 FLUENT 软件计算的不同时刻的预冷温度节点，转化为 ANSYS 可读取的文件，根据各节点的温度值，在 ANSYS 软件里直接进行热应力计算。图 4 为 0.2 m/s 流速预冷 8 h 低温管道热应力图，图 5 为 0.2 m/s 流速预冷 8 h 低温管道位移图。

比较不同预冷速率，在同一时间管道预冷热应力及收缩位移变化，预冷速率越大，管道的热应力和收缩位移就越大；预冷速率增大，在较短的时间内管道温度趋于稳定。因此，在预冷工艺过程中，应严格控制低温管道预冷介质 BOG 气体的流速。图 6 为 0.2 m/s、1 m/s 流速低温管道热应力分布曲线图，图 7 为 0.2 m/s、1 m/s 流速低温管道位移分布曲线图。

低温管道 BOG 气体温度与环境温度的差异而产生伸缩。根据低温管道预冷后的线膨胀量，按下式进行计算：

$$\Delta L = \alpha(t_1 - t_2)L = 11.25 \text{ mm}$$

式中 ΔL ——管道热膨胀伸长量(m)； α ——低温管道的线膨胀系数 $1.67 \times 10^{-5}/\text{K}$ ； t_1 ——环境温度 303 K (30℃)； t_2 ——低温管道预冷的 BOG 温度 153 K (-120℃)； L ——低温管道的长度 5 m。

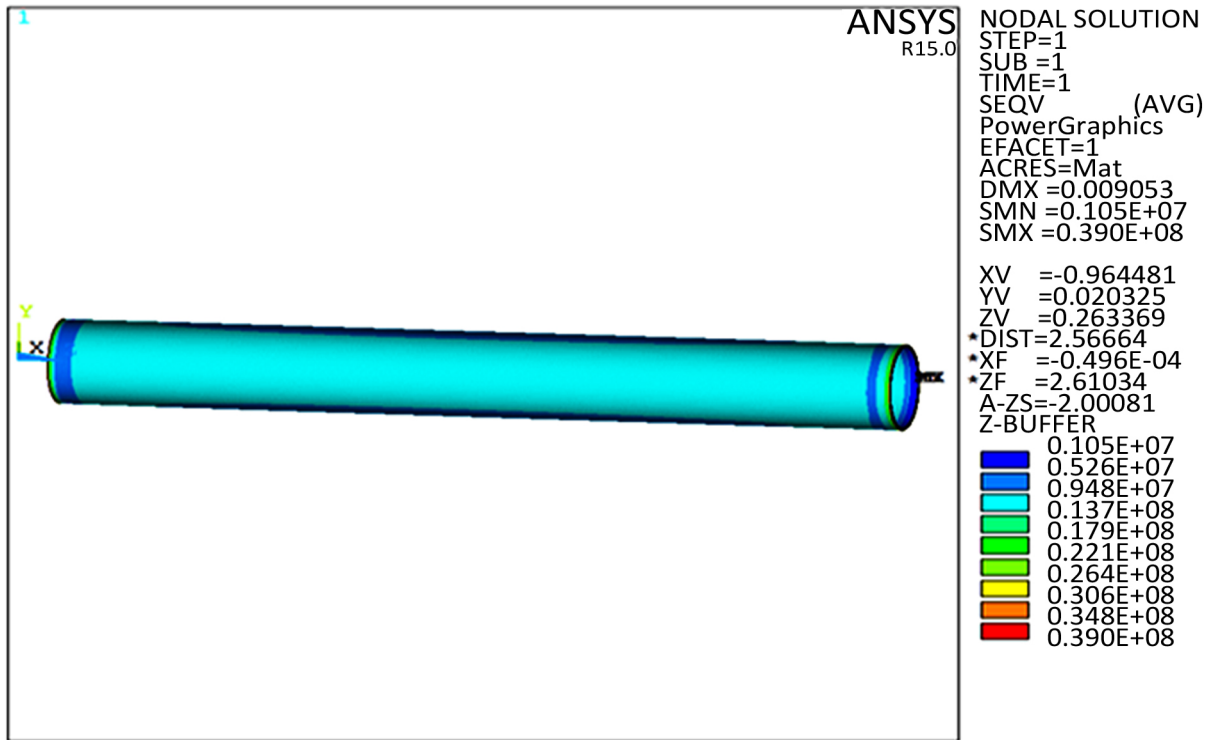


Figure 4. Thermal stress cloud chart of the pipe with the flow velocity of 0.2 m/s after pre-cooling 8 h
 图 4. 0.2 m/s 流速预冷 8 h 热应力图

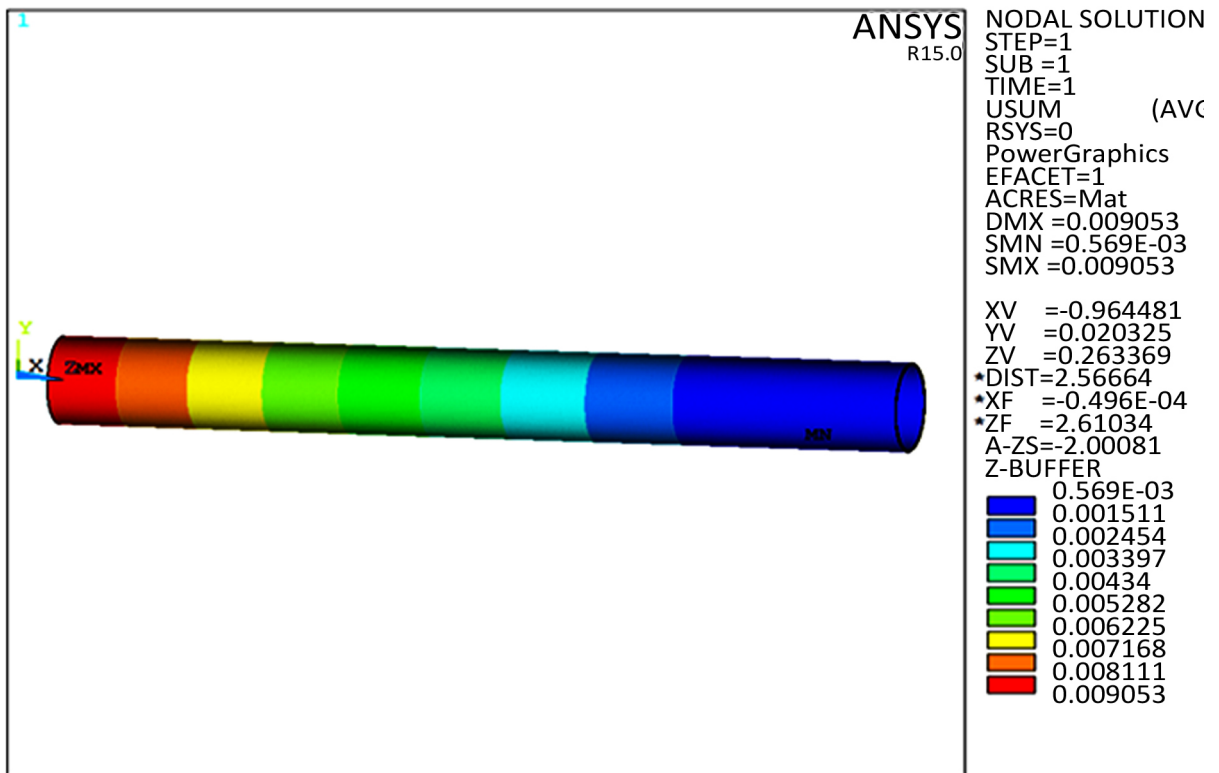


Figure 5. Displacement distribution of the pipe with the flow velocity of 0.2m/s after pre-cooling 8 h
 图 5. 0.2 m/s 流速预冷 8 h 低温管道位移

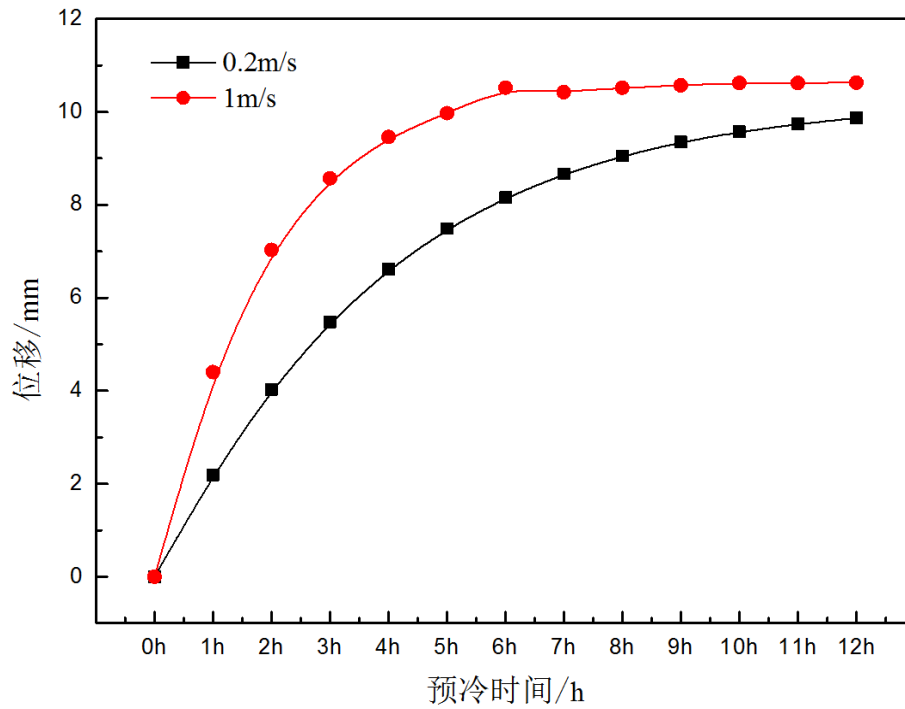


Figure 6. Thermal stress distribution of the pipe under different flow rates
 图 6. 不同流速热应力分布曲线图

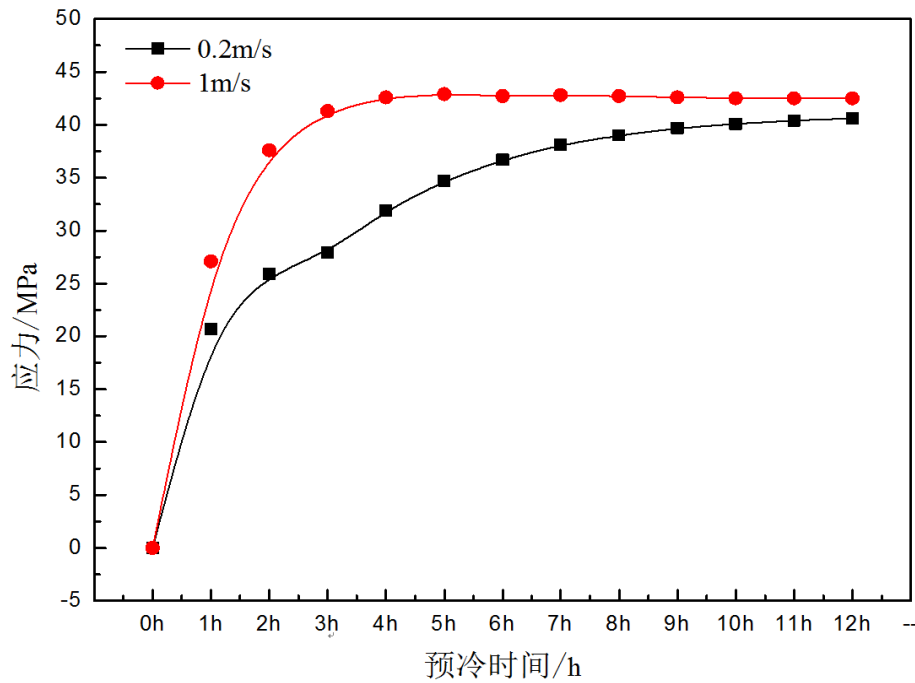


Figure 7. Displacement distribution of the pipe under different flow rates
 图 7. 不同流速低温管道位移分布曲线图

在此次预冷过程中，低温管道预冷出口温度达不到 153 K，因此收缩位移不能按照理想公式进行计算；同时预冷收缩位移与预冷速率、预冷时温度的变化幅度有关。在预冷过程中应逐渐增加流速，同时保证低温管道的温降速率(图 8)。

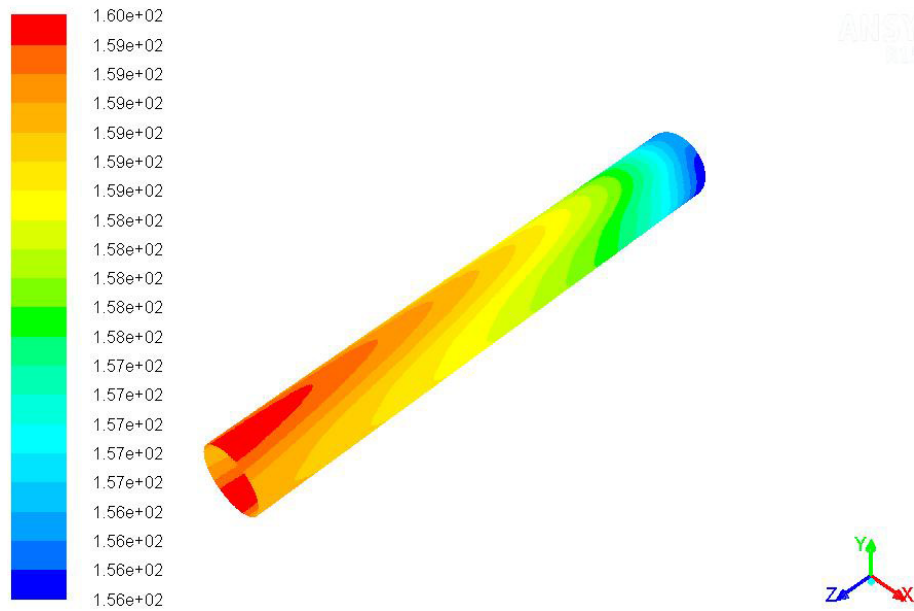


Figure 8. Displacement distribution of the pipe under different flow rates
图 8. 管道预冷过程温度场分布图

由以上预冷计算结果显示，若低温管道的两端加以限制，阻止管道缩短，这时管道的内部将产生很大的热应力。

流速 0.2 预冷完成后热应力计算公式如下：

$$\sigma = E \times \frac{\Delta L}{L} = 410.51 \text{ MPa}$$

流速 1 预冷完成后热应力计算公式如下：

$$\sigma = E \times \frac{\Delta L}{L} = 442.04 \text{ MPa}$$

由以上结果可知，采用 BOG 气体温度 153 K 直接预冷过程中，管道的热应力、收缩位移都超过材料的屈服强度值。因此，低温管道应设置热补偿，预冷应分阶段温度预冷，严格控制预冷温度变化、预冷速率。

热应力是由温度不均匀或热膨胀系数不同而引起的自平衡应力。管道中出现热应力是由于温度改变时管道体积受阻不能呈现其通常应有的尺寸和形状所致。总体热应力与产生总体热应力的结构变形有关，如果总体热应力(不计应力集中)超过材料屈服强度两倍，则弹性分析可能无效，而连续热循环则可能产生畸变增量。

6. 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，根据温度结果数据计算出低温管道预冷热应力和收缩位移。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，管道热应力、收缩位移与预冷温度变化、预冷流速成比例关系，为 LNG 低温管道预冷设置热补偿、管道预冷速度、预冷参数提供了依据。

参考文献 (References)

- [1] 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.

- [2] 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.
- [3] 余红梅, 李兆慈, 孙恒. 水平管道预冷过程研究[J]. 低温与特气, 2009(6): 16-21.
- [4] 童清福. 液化天然气低温管道安装技术[J]. 城市燃气, 2014(5): 14-16.

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: mos@hanspub.org