

# Numerical Simulation on the Temperature Field and Thermal Stress Distribution of the 30,000 m<sup>3</sup> LNG Storage Tank

Guoqiang Dong<sup>1</sup>, Liping Dong<sup>2</sup>, Junman Shu<sup>2</sup>, Yachen Xu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Daqing Drilling Engineering Corporation, Daqing Heilongjiang

<sup>2</sup>Installation Company of Daqing Oilfield Engineering Construction Co., Ltd., Daqing Heilongjiang

<sup>3</sup>Research Center of Advanced Energy Equipment Technology, Tianjin Research Institute for Advanced Equipment, Tsinghua University, Tianjin  
Email: xyc@tsinghua-tj.org

Received: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2016; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2016; published: Dec. 23<sup>rd</sup>, 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

CATIA software is used to build two-dimensional and three-dimensional model of LNG storage tank. Hexahedral meshes are generated in HYPERMESH software and ANSYS software is imported to analyze overall temperature field and thermal stress distribution of 30,000 m<sup>3</sup> LNG storage tank. According to analysis result file, the distribution regularities of temperature and thermal stress of 30,000 m<sup>3</sup> LNG storage tank are concluded; key control points of cold insulation construction of LNG storage tank are highlighted; management of quality of cold insulation construction of LNG storage tank is tightened up and LNG construction level is upgraded.

## Keywords

LNG Storage Tank, Hexahedral Mesh, Temperature Field, Thermal Stress

---

# 3万立LNG储罐整体温度场及热应力分析

董国强<sup>1</sup>, 董利萍<sup>2</sup>, 舒均满<sup>2</sup>, 徐雅晨<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大庆钻探工程公司, 黑龙江 大庆

<sup>2</sup>大庆油田工程建设有限公司安装公司, 黑龙江 大庆

<sup>3</sup>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: xyc@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

采用CATIA软件建立LNG储罐二维、三维实体模型,在HYPERMESH软件里划分六面体网格,导入ANSYS软件计算分析3万立LNG储罐整体温度场及热应力分布。根据计算结果文件,总结3万立LNG储罐温度及热应力分布规律,提出LNG储罐保冷施工的关键控制点,加强对LNG储罐保冷施工质量的管理,提升了LNG施工水平。

## 关键词

LNG储罐, 六面体网格, 温度场, 热应力

## 1. 引言

随着国家经济的发展和能源的需求增大,特别是天然气消费量逐年增长。液化天然气(LNG)是一种清洁高效的低碳能源,近年来在国内得到了快速的发展,具有广阔的市场前景。

LNG储罐作为LNG工艺的重要储存设备,其保冷结构的合理对LNG运行、输送起到至关重要作用。在大型LNG储罐的保冷施工中,往往出现工作量大,交叉作业多,施工控制环节薄弱,施工水平低,作业风险高等难题[1]。LNG储罐结构较复杂,保冷施工达不到要求,会造成“热短路”现象,对LNG储罐运行不利。本文通过研究3万立LNG在不同季节下的温度和应力耦合场,分析LNG储罐温度场和应力场的分布规律,对LNG储罐保冷施工具有指导意义。

## 2. 3万立LNG储罐结构特点

储罐的最大容积3万立方米,罐内外罐罐壁均为圆柱形(图1)。内罐高度26.212 m,内罐半径20.75 m,外罐高度35.998 m,外罐半径21.75 m。各部分结构如下,各部分材料属性如表1所示:

(1) 罐顶最里层(第一层)为0.005 m厚的铝吊顶,第二层为0.8 m玻璃纤维,第三层为空气,第四层为0.01 m厚的Q345R钢板。

(2) 罐壁最内层(第一层)是(0.008 m~0.02 m)厚的06Cr19Ni10钢板,第二层为0.3 m厚的弹性毡,第三层是0.7 mm厚的膨胀珍珠岩层,第四层为5 mm厚的Q345R钢板。

(3) 罐底最上层(第一层)是0.005 m厚的06Cr19Ni10钢板,第二层是0.05 m厚的干沙层;第三层是0.6 m厚的泡沫玻璃砖层,第四层为0.05 m厚的沥青层,第五层为0.006 m厚的Q345R钢板,最外层(第五层)是1 m厚的混凝土层。内罐底边缘是0.4 m×0.8 m的混凝土环梁。

## 3. 二维结构温度场计算与分析

### 3.1. 温度边界条件

储罐内罐工作温度-163℃,设计液位23.6 m。参照北方的气候特点,夏季环境温度取30℃,冬季环境温度取-30℃ [2]。对储罐进行温度加载,采用第三类边界条件,空气对流换热系数 $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;液面与内罐吊顶甲板之间充满BOG气体,BOG气体对流换热系数取 $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

### 3.2. 储罐在不同环境温度下的温度场数值模拟

取夏季、冬季环境温度对储罐温度场进行模拟, 得到不同环境温度下储罐结构的温度分布(图 2、图 3)。

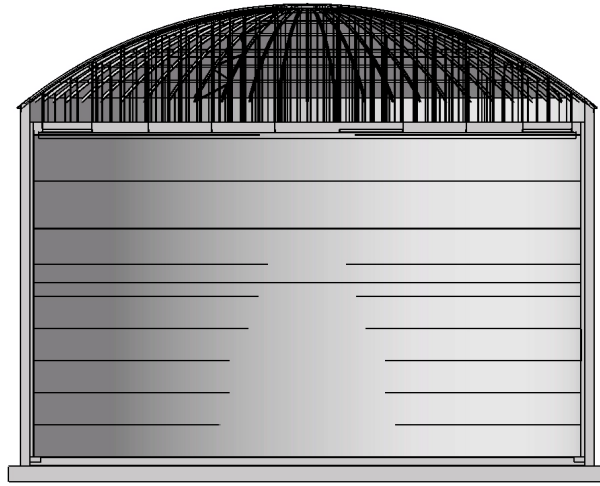


Figure 1. Cutaway view of 30,000 m<sup>3</sup> LNG storage tank  
图 1. 3 万立 LNG 储罐剖视图

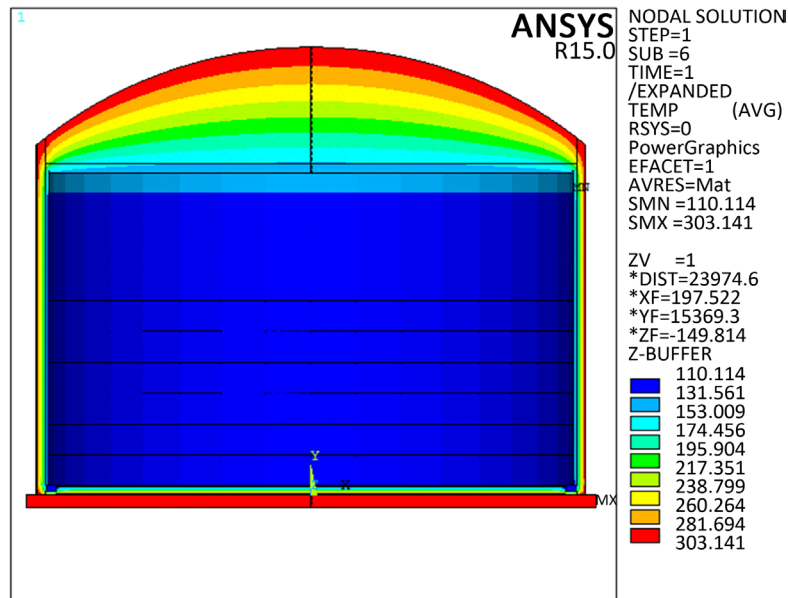


Figure 2. Temperature distribution of LNG storage tank in summer  
图 2. 夏季 LNG 储罐温度场分布

Table 1. Properties of the material

表 1. 主要材料属性

序号	名称	弹性模量 E (Pa)	泊松比 u	导热系数 W/(m·k)	线性热膨胀系数	比热容 c J/(kg·K)	密度 kg/m <sup>3</sup>
1	内罐 0Cr18Ni9	2.08E11	0.2	11.8	1.67E-5	460	8000
2	聚氨酯泡沫	39.4E6	0.42	0.03	1.4E-5	1380	50
3	高密度聚氨酯泡沫	39.4E6	0.42	0.03	1.4E-5	1380	80
4	外罐	2.1E11	0.274	43	8.0 E-6	440	7860

根据温度计算结果绘制罐底温度变化曲线图，如图 4、图 5 所示，该图表示夏季、冬季罐底的温度场分布。从纵向看，在主容器罐底层(0~0.05 m 处)，温度几乎无变化，这是因为该层主要 Ni 钢板及混凝土层导热系数大，传热效果好，几乎不起保温作用。在保温层(0.05~0.65 m 处)中，温度梯度很大，这是因为泡沫玻璃砖起到了很好的保冷作用，使低温不容易向外扩散。在(0.65~1.72 m 处)，温度与罐外温度都比较接近，这是因为混凝土和 Q345R 钢板的导热系数大，受罐外温度变化的影响也比较大。

如图 6、图 7 所示，从表中横向看，温度沿罐壁厚度方向逐渐升高，在(0~0.02 m)处，温度几乎无变化，这是因为该层主要 Ni 钢板导热系数大，传热效果好，几乎不起保温作用。在(0.02~1 m)处，温度沿壁厚方向变化很大，这是因为弹性毡和膨胀珍珠岩，这二者具有很小的导热系数，能够很好的阻止温度

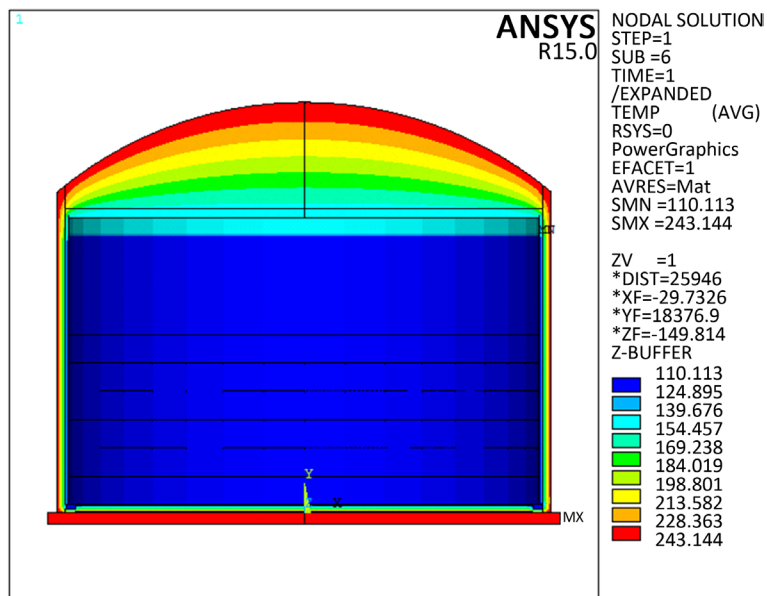


Figure 3. Temperature distribution of LNG storage tank in winter  
图 3. 冬季 LNG 储罐温度场分布

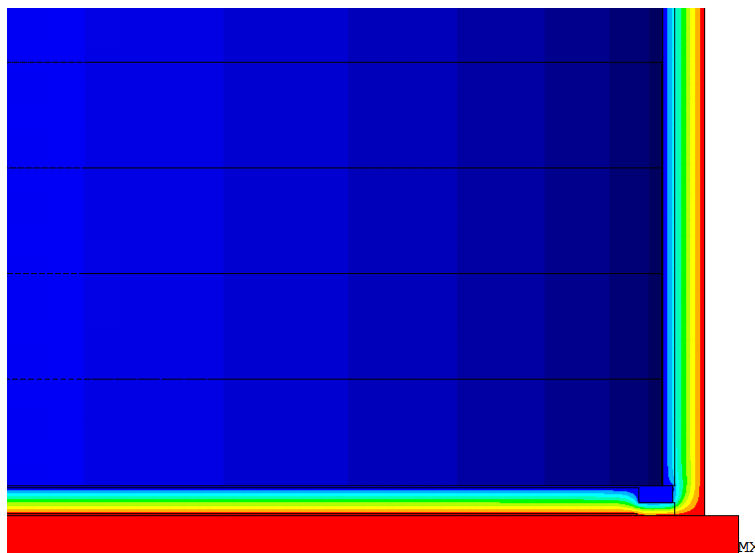


Figure 4. Temperature distribution of LNG storage tank bottom  
图 4. 罐底温度场分布图

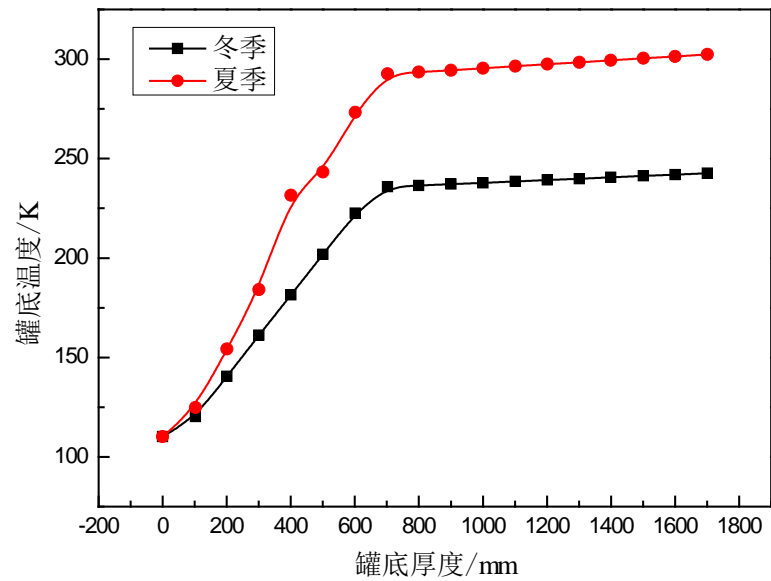


Figure 5. Temperature responses with the different thickness of LNG storage tank bottom in summer and winter

图 5. 冬、夏两季罐底温度随厚度变化曲线

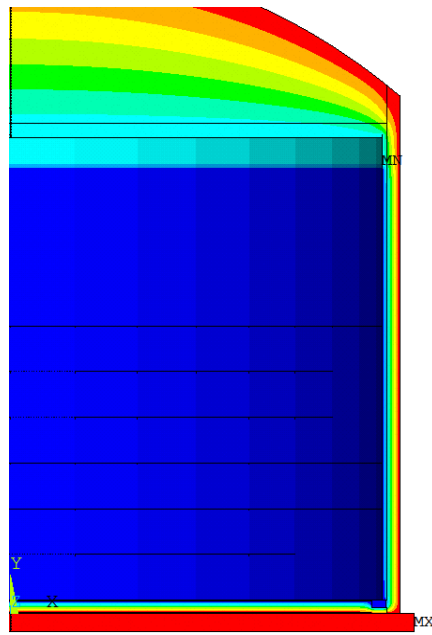


Figure 6. Temperature distribution of LNG storage tank wall

图 6. 罐壁温度场分布图

的传递，形成了很大的温度梯度；在(1~1.009 m)处，温度几乎无变化，主要是 Q345R 钢板的导热系数较大，受罐外温度变化的影响大。

如图 8、图 9 所示，罐顶沿垂直方向，温度逐渐升高，温度变化最大的区域集中在玻璃棉保温层和空气层(玻璃棉与拱顶之间)。在(0~0.8 m)处主要是玻璃棉导热系数低，具有很好的保温作用；在(0.8~10.19 m)，主要是内罐与外罐之间的空气层导热系数低，温度进入该层时产生了很大的变化，起到了很好的保冷作用。

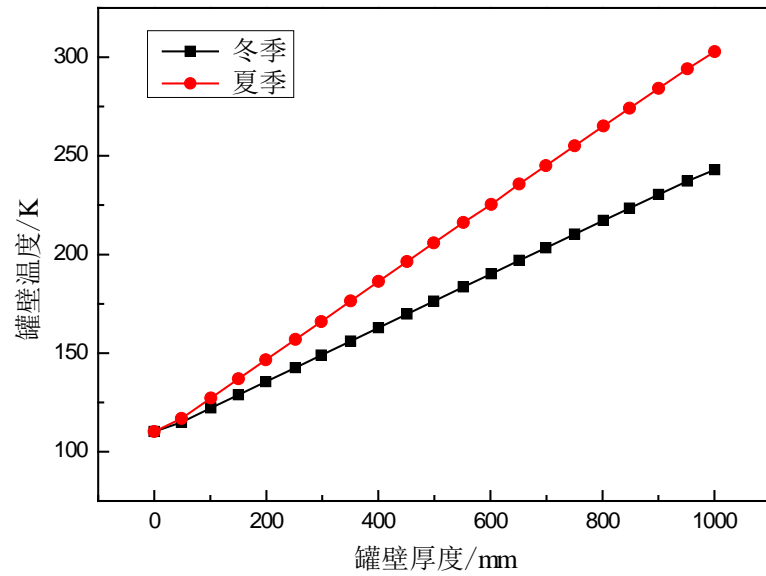


Figure 7. Temperature responses with the different thickness of LNG storage tank wall in summer and winter

图 7. 冬、夏两季罐壁温度随厚度变化曲线

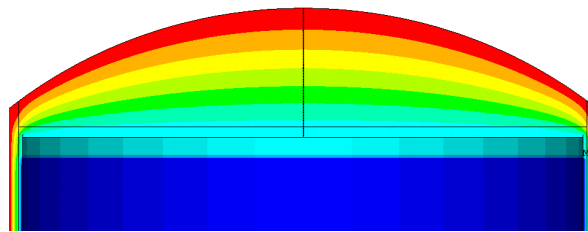


Figure 8. Temperature distribution of LNG storage tank roof

图 8. 罐顶温度场分布图

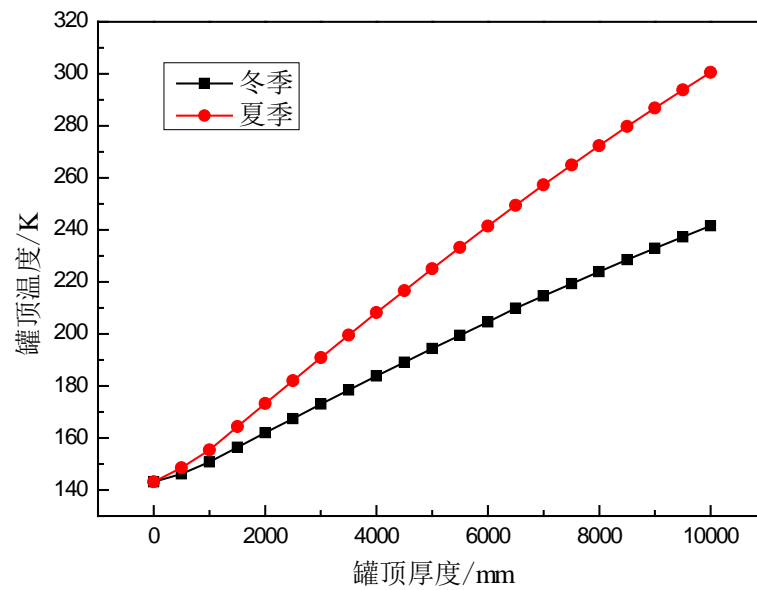


Figure 9. Temperature responses with the different thickness of LNG storage tank roof in summer and winter

图 9. 冬、夏两季罐顶温度随厚度变化曲线

如图 10 所示,内罐边缘处有一圈混凝土环梁,环梁的导热系数高,导致低温向拐角处有明显的延伸,沿罐底径向产生很大的热流,容易出现“热短路”现象。因此,在此处保温时,应作为关键控制点重点检查,保证泡沫玻璃砖的密实度,减少通过外罐底的漏热量,避免形成热桥。

#### 4. 三维实体模型 LNG 储罐温度场数值模拟

采用 CATIA 软件建立了 LNG 储罐三维实体模型,经专业网格划分软件将储罐划分成六面体网格,并定义材料属性,导入到 ANSYS 软件设置边界条件,立体地、全方位查看 LNG 储罐各部位的传热过程,更准确实现 LNG 储罐的数值模拟[3]。图 11 为 LNG 储罐六面体网格剖视图,图 12 为六面体网格整体视图。

在此情况下,六面体网格是最合适的,六面体允许一个比四面体网格大的多的纵横比,网格数量少,网格质量高,计算精度高,计算的时间短。储罐直径 43.5 m,壁厚最小只有 0.008 m,用四面体划分出整体网格对计算机配置要求很高。图 13 为 LNG 储罐截面温度场分布图,图 14 为 LNG 储罐整体温度场分布图。

LNG 储罐三维整体温度场模拟效果更为直观,部分储罐结构并不是按轴对称进行对称分布,应按照储罐的完整结构进行温度场模拟分析。

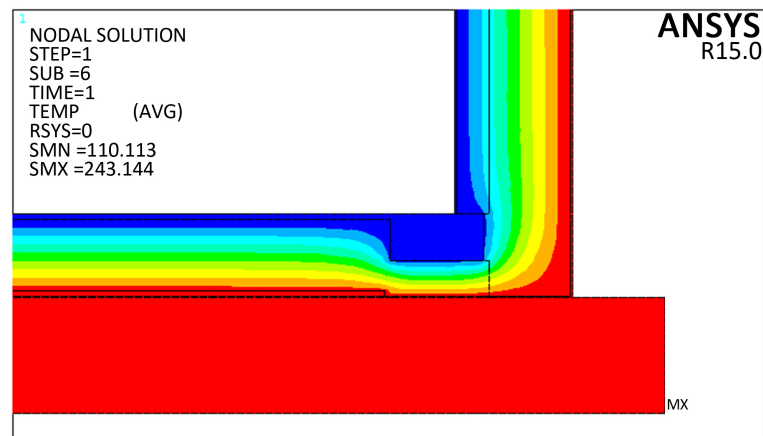


Figure 10. Temperature distribution of the concrete ring beam of LNG storage tank

图 10. LNG 储罐混凝土环梁温度分布

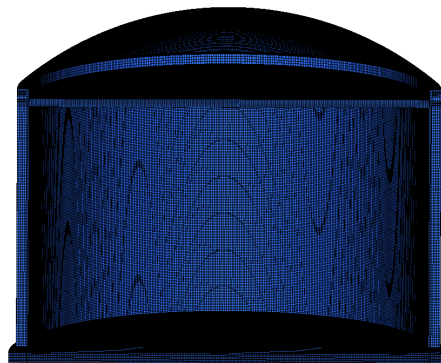


Figure 11. Hexahedral mesh of LNG storage tank in section view

图 11. LNG 储罐六面体网格剖视图

## 5. LNG 储罐热应力数值模拟

由于保温材料弹性大，对结构不起承载力作用，利用“生死单元法”去掉保温材料，采用间接耦合法，分析内罐结构和外罐结构的热应力。

经计算结果显示，内罐的最大热应力为 43 MPa，根据第四强度准则，最大应力远小于材料的在低温下的允许应力(图 15)。应力产生的原因是由于内罐里液体温度为 $-163^{\circ}\text{C}$ ，液面至铝吊顶之间为 BOG 气体，温度大于液体温度，由此产生了热应力。

外罐由于受环境温度影响，而保冷材料起到了绝热作用，罐壁温度几乎不发生变化，产生的热应力特别小，可以忽略。

## 6. 结论

通过对 LNG 储罐二维、三维整体温度场及热应力耦合场计算分析，获得了 LNG 储罐温度场及热应

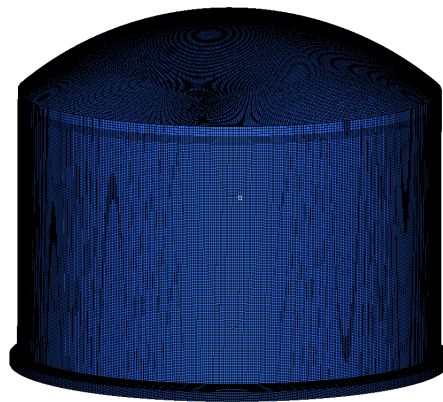


Figure 12. Hexahedral mesh of LNG storage tank in global view

图 12. LNG 储罐六面体网格整体视图

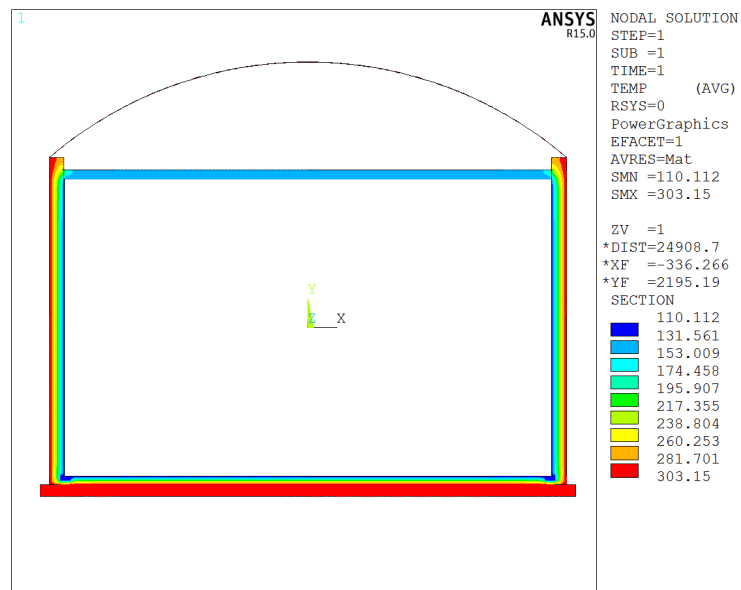


Figure 13. Temperature distribution of LNG storage tank in section view

图 13. LNG 储罐截面温度场分布图



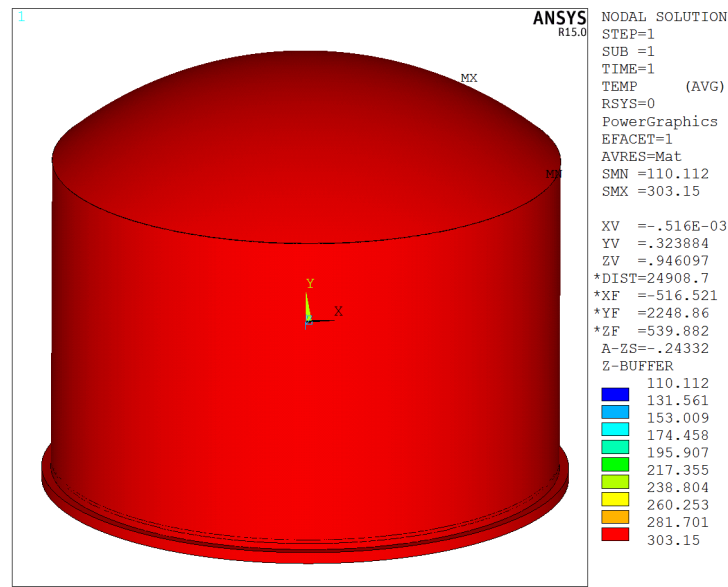


Figure 14. Temperature distribution of LNG storage tank in global view  
 图 14. LNG 储罐整体温度场分布图

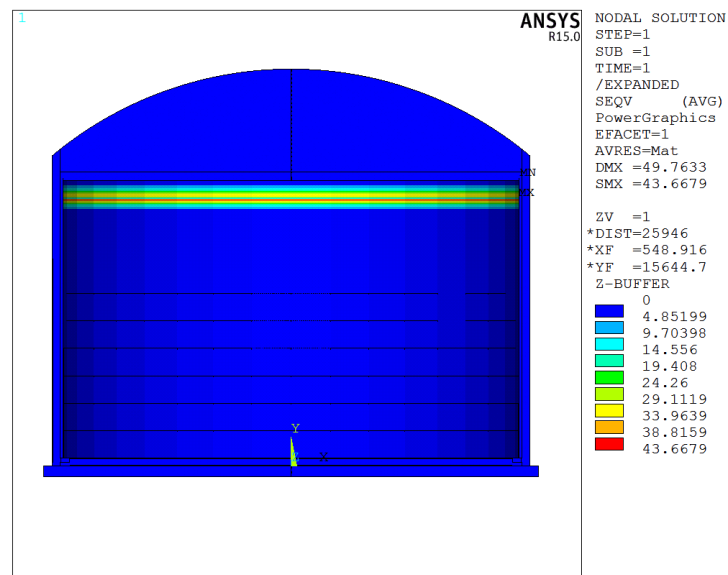


Figure 15. Thermal stress distribution of LNG storage tank  
 图 15. LNG 储罐内罐热应力分布

力的分布。由计算结果显示，在罐底、罐壁绝热结构交汇处的保冷施工非常重要，作为关键检查点重点监督管理，减少罐底的漏热量，提升 LNG 储罐施工水平，提高 LNG 储罐使用寿命。同时施工时应采取防潮干燥措施，防止导热系数增加，降低绝热效果。

### 参考文献 (References)

- [1] 李海润, 徐嘉爽, 李兆慈. 全容式 LNG 储罐罐体温度场计算及分析[J]. 天然气与石油, 2012, 30(4): 15-19.
- [2] 李兆慈, 郭保玲, 赵多. 基于 ANSYS 的 LNG 储罐罐体温度场的数值计算[J]. 石油工程建设, 2014, 40(5): 9-11.
- [3] 周波. LNG 储罐外罐壁静力有限元分析[J]. 四川建材, 2014(2): 57-58.

**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](mailto:mos@hanspub.org)