

基于 FLUENT 软件的大型 LNG 储罐预冷研究

董文浩¹ 郑 劲¹ 许培林¹ 郭海峰² 季夏夏¹

1. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500;

2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司, 四川 成都 610051

摘 要: LNG 储罐预冷是 LNG 接收站正式投入工作前的重要环节, 目前我国主要采用顶部环状喷注方式进行 LNG 储罐预冷。为了避免预冷过程中出现壁面温差过大的现象, 利用 FLUENT 软件对 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐预冷过程进行了模拟研究, 分析了目前储罐在预冷过程中存在的问题, 并对预冷方式进行了改进。研究表明: 顶部预冷方式容易造成储罐内冷量聚集; 管径和进气速度是罐内温度层形成的重要影响因素, 改进后的柱状预冷方式能更好地防止储罐内壁产生大温差, 加强储罐的使用安全性, 延长使用寿命。

关键词: LNG 储罐; 预冷; 模拟; 影响因素

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2015.04.017

0 前言

随着我国能源需求的不断增长, 引进 LNG 有利于优化我国能源结构, 有效解决能源供应安全和生态环境保护的双重问题, 对实现社会经济的可持续发展具有重要作用。未来一段时期内, LNG 将成为我国天然气市场的主力军, LNG 储罐预冷则是 LNG 接收站正式投运前的关键环节。

目前我国 LNG 储罐预冷主要采用的是顶部环状喷注方式, 在喷注过程中气体由上向下运动, 罐壁在轴向上出现较大温差和局部冷却, 致使储罐内壁产生过大的应力并出现异常收缩现象, 由此产生的应力与储罐建造和焊接过程中产生的应力叠加, 导致储罐在应力集中处破裂^[1-3]。因此, 针对环形壁面温差过大的现象, 基于 FLUENT 软件对 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐的液氮预冷过程进行模拟研究, 分析了顶部环状喷注方式在预冷过程中存在的问题, 提出了柱状喷注方式, 并对两种预冷方式进行了比较。

1 LNG 储罐预冷

1.1 预冷方式

LNG 储罐预冷是通过预冷管线喷淋完成, LNG 储罐结构及工艺流程示意图见图 1。氮气置换完成后, 关闭

储罐所有阀门。储罐内部保持微正压, 通过调节 XV 146 阀打开氮气预冷管线, 开始喷注冷却氮气或 BOG 气体对储罐进行预冷, LNG 全容储罐设计压力 29 kPa, 所以开车预冷时罐内压力须控制在 20 kPa 以下^[4]。

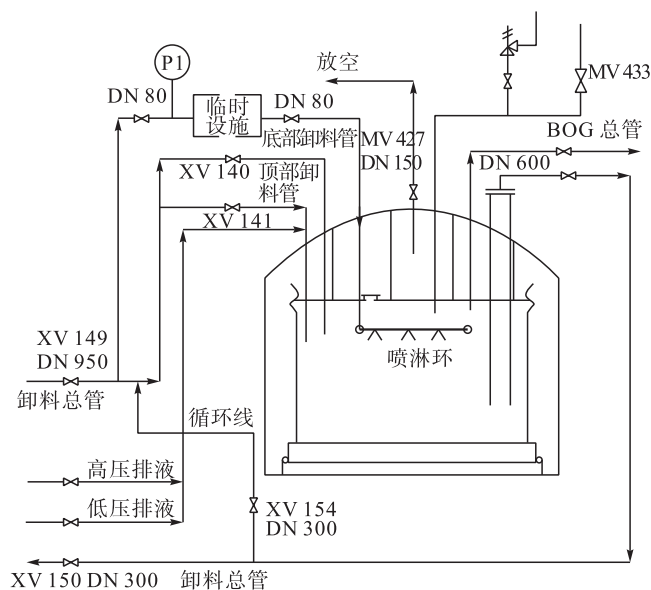


图 1 LNG 储罐结构及工艺流程示意图

收稿日期: 2015-01-04

作者简介: 董文浩 (1988-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事天然气处理和液化天然气技术研究。

1.2 预冷规范要求

根据欧洲标准 BSEN 14620《设计和现场建造立式、圆筒形、平底、钢制、操作温度介于 $0 \sim -165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷却液化气储罐》规定, LNG 储罐整体冷却目标速率为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 不能超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。为了能够监测罐内温降梯度, 在储罐多处安装了温度传感器, 以便控制内罐底部或罐壁任意 2 个相邻监测点的温差不超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 顶部环状喷注预冷方式

2.1 模型建立

2.1.1 控制方程

FLUENT 的湍流 $k-\varepsilon$ 模型包括标准 $k-\varepsilon$ 模型、重组化群 $k-\varepsilon$ 模型和可实现 $k-\varepsilon$ 模型。其中, 可实现 $k-$

ε 模型是标准 $k-\varepsilon$ 模型的一种改进格式, 它能较准确地计算圆形射流, 其对旋流和分离流的计算结果明显优于标准 $k-\varepsilon$ 模型的计算结果, 故采用可实现 $k-\varepsilon$ 模型对喷注流场进行模拟^[5]。用于求解流动及换热问题的控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程、 k 方程和 ε 方程, 采用可实现 $k-\varepsilon$ 模型求解流动及换热问题时, 这些方程均可写成如下通用形式:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S \quad (1)$$

在三维直角坐标系下, 通用形式相对应的可实现 $k-\varepsilon$ 模型的控制方程见表 1^[6-7]。

表 1 可实现 $k-\varepsilon$ 模型的控制方程

方程	ϕ	扩散系数	源项 S
连续方程	1	0	0
x -动量	u	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + S_u$
y -动量	v	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + S_v$
z -动量	w	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + S_w$
湍动能	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k - \rho\varepsilon$
耗散率	ε	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$\rho\varepsilon \left(C_1 E - \frac{C_2 \varepsilon}{\sqrt{v\varepsilon}} \right)$
能量	T	$\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}$	依据实际问题而定

湍动黏性系数表达式:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: u, v, w 分别为 x, y, z 方向的速度, m/s ; ρ 为密度, kg/m^3 ; p 为压强, Pa ; k 为单位质量湍动能, m^2/s^2 ; ε 为单位质量能量耗散率, m^2/s^3 ; T 为温度, K ; Pr 为能量的湍流普朗特数, 取值 0.85; S 为用户根据计算工况定员源项; $\mu_{\text{eff}}, \mu_t, \mu$ 分别为有效黏性系数、湍流黏性系数, 动力黏性系数; $C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 在 FLUENT 软件中默认为常数, 取值 $C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.1, \sigma_\varepsilon = 1.3$; G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能产生量; 系数 E, C_μ, C_1 和 σ_T 的求解较为复杂, 在此不做讨论。

2.1.2 计算模型

本次选取 $16 \times 10^4\text{ m}^3$ 的储罐为算例, 储罐内壁高 34.6 m, 内径 80 m, 外径 82 m^[8]。根据 FLUENT 软件在

实际应用中物理模型建立时的原则, 对实际储罐预冷进行假设:

1) 储罐顶部的喷注装置呈对称分布, 因此将其视为二维平面问题。

2) 储罐环向侧壁材料从内到外依次为 9% Ni 钢、保温层和预应力混凝土, 保温层由玻璃纤维毯、膨胀珍珠岩和泡沫玻璃砖组成^[9]。本文主要研究不同氮气注入方式对储罐内温度分布和 Ni 钢壁面温差的影响, 因此, 将多层保温材料组成的保温层简化为一层性能等同的外界固体壁^[10]。

3) 根据储罐壁厚计算, 对于储罐内壁的钢板厚度取其平均值。

4) 定义外界为常温 293 K, 标准大气压力, 不考虑外界热源辐射传热。

$16 \times 10^4\text{ m}^3$ 储罐侧壁相关参数见表 2^[11]。

表2 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐侧壁相关参数

材料	密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	热导率 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	平均厚度 / cm	比热容 / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
9 % Ni 钢	7.860	14.7→7.9	1.6	480→1.9
玻 璃 纤 维 毯	0.016	0.038 83	34	792
膨 胀 珍 珠 岩	0.760	0.039 10	51	753.74
泡 沫 玻 璃 砖	2.180	0.055 92	15	837.49
预 应 力 混 凝 土	2.500	2.326	70	837.21

注: Ni 钢热导率和比热容的“→”表示这两项有随着温度降低而降低的性质。

利用 GAMBIT 软件建立模型, 选择三角形自由网格进行模型划分, 并适当控制网格尺寸。对钢板的传热壁面进行边界层网格划分。保温层设置为有壁厚固体壁, 钢板设置为薄壁模型。顶部环状喷注预冷二维模型见图 2, 其中顶部每隔 5 m 设置一个氮气喷管, 喷管直径为 0.3 m。

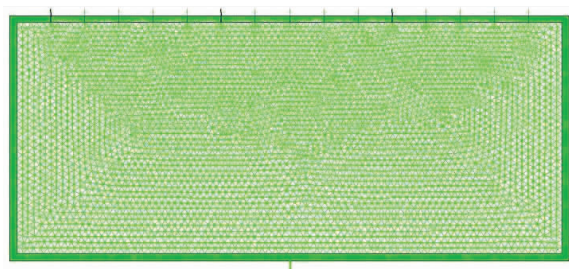


图2 顶部环状喷注预冷二维模型

2.1.3 边界条件

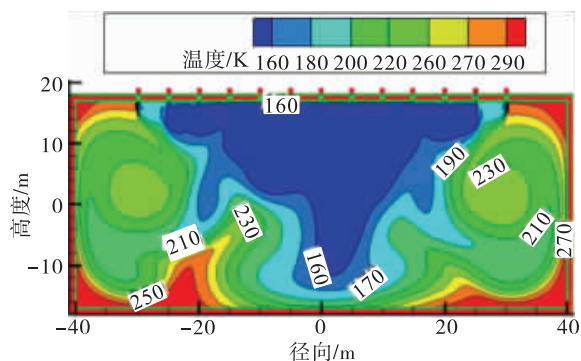
采用 -120°C 的氮气为工作介质, 预冷前初始罐内气体为氮气, 罐体和罐内温度为常温 293 K , 设置储罐钢板和氮气接触面为流固耦合传热。

2.2 模拟结果

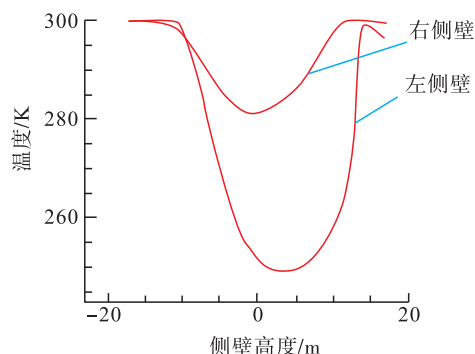
流速 2 m/s 顶部喷注预冷的温度分布云图和侧壁轴向温度分布见图 3, 由图 3 可见储罐顶部出现大面积低温区域, 说明有大量的冷量聚集。温度在储罐内分布很不均匀, 在 $250 \sim 300 \text{ K}$ 的温度层面积很小, 温度层很薄, 观测图 3-b) 可见, 左右壁面温降不一致, 左壁面上温度梯度较大, 最大温差高达 40°C , 超过了相关规范要求。经对 $1, 2, 3, 4 \text{ m/s}$ 流速模拟可知, 储罐中的温度分布基本与图 3 相似。

流速 10 m/s 顶部喷注预冷的温度分布云图和侧壁轴向温度分布见图 4。与图 3 相比, 图 4 中温度场分布规则, 但进气速度的增加没有改变 $260 \sim 290 \text{ K}$ 的温度层面积, 对内壁面的钢材来说仍会造成壁面温降过快。图

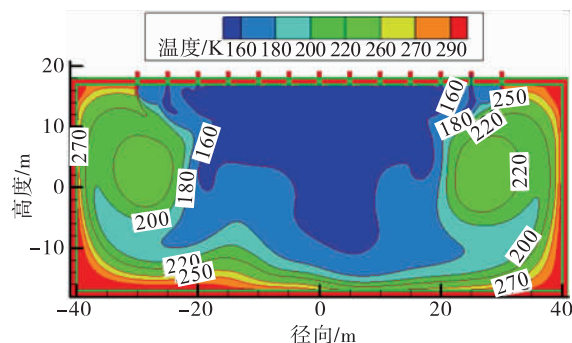
4 侧壁温差在 20°C 左右, 小于图 3 中的侧壁温差幅度, 但在某些局部位置还是形成了 25°C 的温差, 储罐中仍存在大面积的冷量聚集区域。



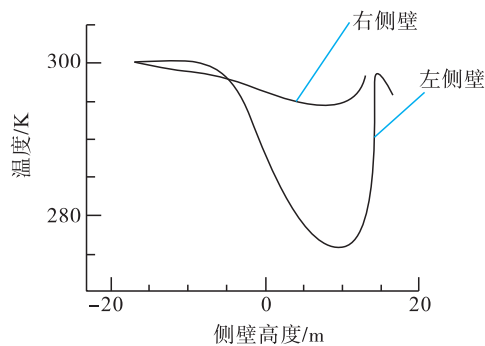
a) 温度分布云图



b) 侧壁轴向温度分布

图3 流速 2 m/s 顶部喷注预冷

a) 温度分布云图



b) 侧壁轴向温度分布

图4 流速 10 m/s 顶部喷注预冷

3 温差影响因素分析

3.1 产生温差的原因

对目前实际生产中使用管径为 0.3 m 喷嘴进行单管进气工况模拟,在管道的进气口段,冷却气体由上向下运动,周围的气体向预冷气体靠近并随着预冷气体一起运动,在储罐内形成漩涡,单管预冷时进气口处的速度

矢量分布见图 5。由此即可解释图 3~4 中的温度分布现象:顶部喷注的气体由上向下运动,底部气体从罐壁两侧上升,导致顶部几个喷嘴喷注的冷却气流向中间集中靠拢,出现顶部冷量聚集现象,因此气流运动是温度层形成的主要原因。综上所述,影响储罐内温度层形成的因素有进气管径、进气速度和进气位置。

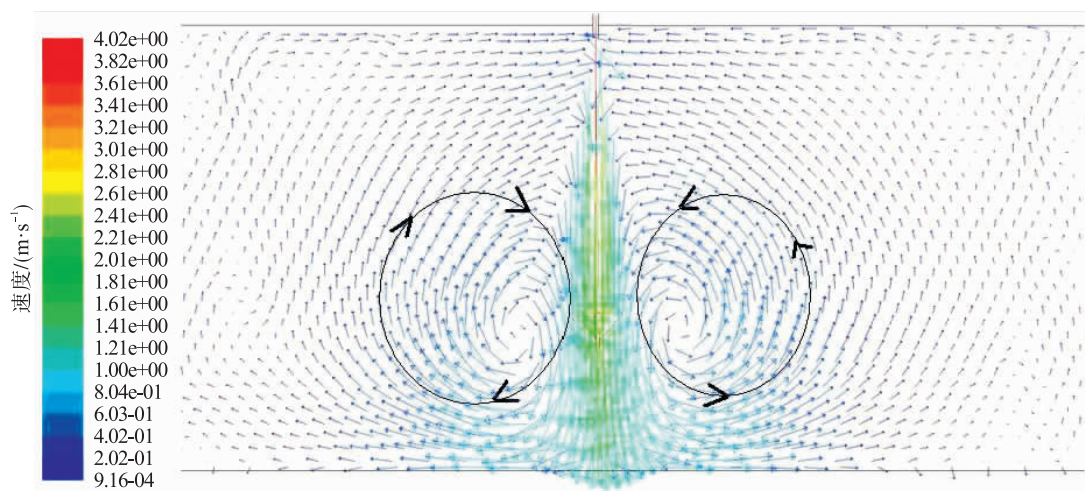


图 5 单管预冷时进气口处的速度矢量分布

3.2 最佳管径和进气速度

最佳管径和进气速度须保证温降达到 3 ℃/h,温度差控制在符合要求的 30 ℃ 范围内。在规定单位时间内达到温降要求的情况下,各管径对应的最小进气速度和最少进气口个数见表 3。

表 3 各管径对应的最小进气速度和最少进气口个数

管径 / m	最小进气速度 / (m · s ⁻¹)	最少进气口 / 个
0.6	0.005	1
0.5	0.04	2
0.45	0.042	3
0.4	0.045	4
0.37	0.046	5
0.33	0.047	6
0.3	0.05	6
0.28	0.051	7
0.25	0.52	7
0.2	1.0	8
0.18	1.5	8
0.16	2.0	9
0.14	3.0	10
0.12	3.8	12
0.1	6.8	15
0.09	7.0	17
0.08	16	20
0.07	20	24

结合表 3 数据,利用 ORIGIN 软件计算得到进气速度和管径关系拟合公式:

$$y = 50.572e^{-\frac{x}{0.04875}} + 0.042 \quad (3)$$

最小进气速度和管径关系拟合图见图 6。由图 6 可见,管径 0.3 m 为 1 个特征点,当管径小于 0.3 m 时,不同的管径要求进气速度相差很大,对储罐内温度层影响较大。当管径大于 0.3 m 时,进气速度相差较小,且都处于较低的流速,对温度层影响较小,式(3)为氮气预冷的改进提供了理论依据。

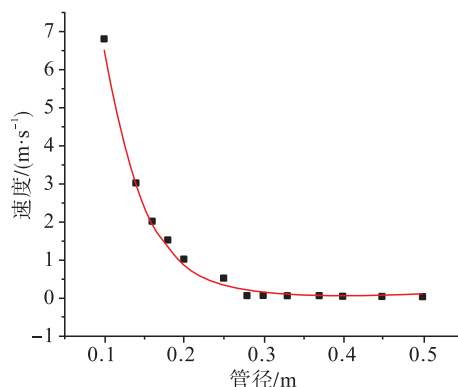


图 6 最小进气速度和管径关系拟合图

4 柱状喷注预冷方式

4.1 柱状喷注预冷结构模型

改进后的柱状喷注预冷二维模型见图 7,氮气输气管道干线两侧每间隔 5 m 设置 1 个喷嘴,喷嘴直径为 0.15 m。

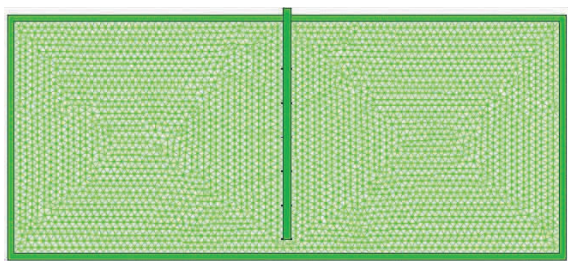


图7 改进后的柱状喷注预冷二维模型

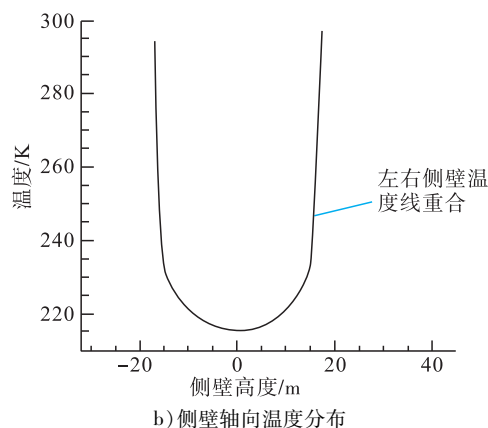
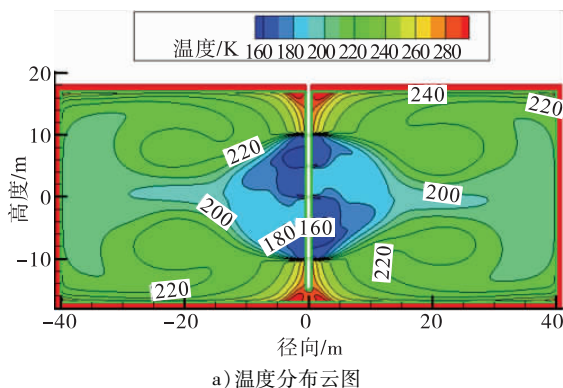


图8 流速 5 m/s 柱状喷注预冷

5 两种预冷方式对比

进行 LNG 储罐预冷时先将液氮槽车增压到 0.6 MPa, 对应温度为 $-177\text{ }^{\circ}\text{C}$, 考虑沿程冷损, 因此, 采

用喷入储罐内部时液氮的温度设定为 $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不同流速下顶部环状喷注的温度场分布变化过程见图 9~10, 柱状喷注的温度场分布变化过程见图 11。

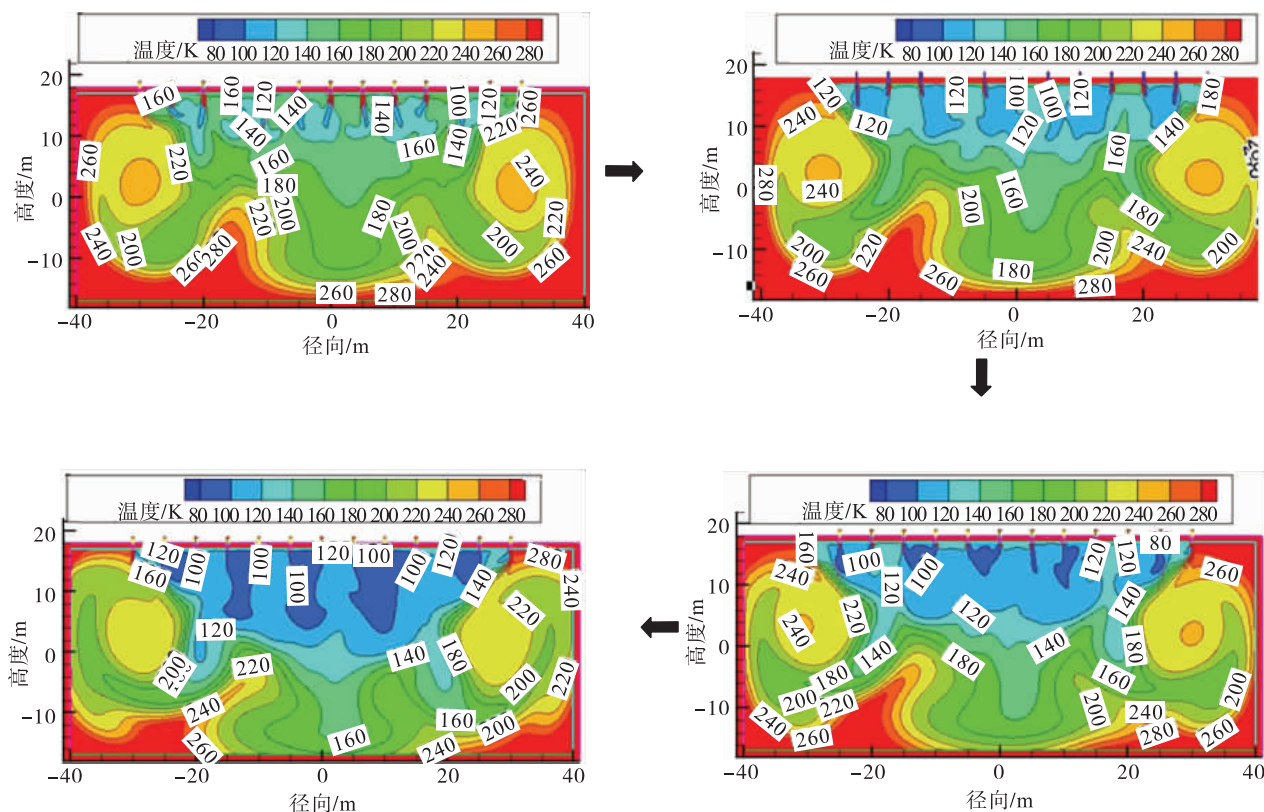


图9 低流速 4 m/s 顶部环状喷注温度场分布变化过程

4.2 柱状喷注预冷模拟结果分析

流速 5 m/s 柱状喷注预冷温度分布云图和侧壁轴向温度分布见图 8。与顶部喷注预冷方式相比, 图 8 中温度层厚度增大, 温度层分布形状相似, 尤其是轴向温度层分布更加规则, 保证轴向侧壁面达到同步温降。图 8b) 中左右轴向侧壁温度分布曲线重合, 处于 220 ~ 240 K 侧壁面积占总侧壁面积的 90 %, 侧壁整体基本是处在一个很小的温差范围内, 完全符合储罐预冷要求。

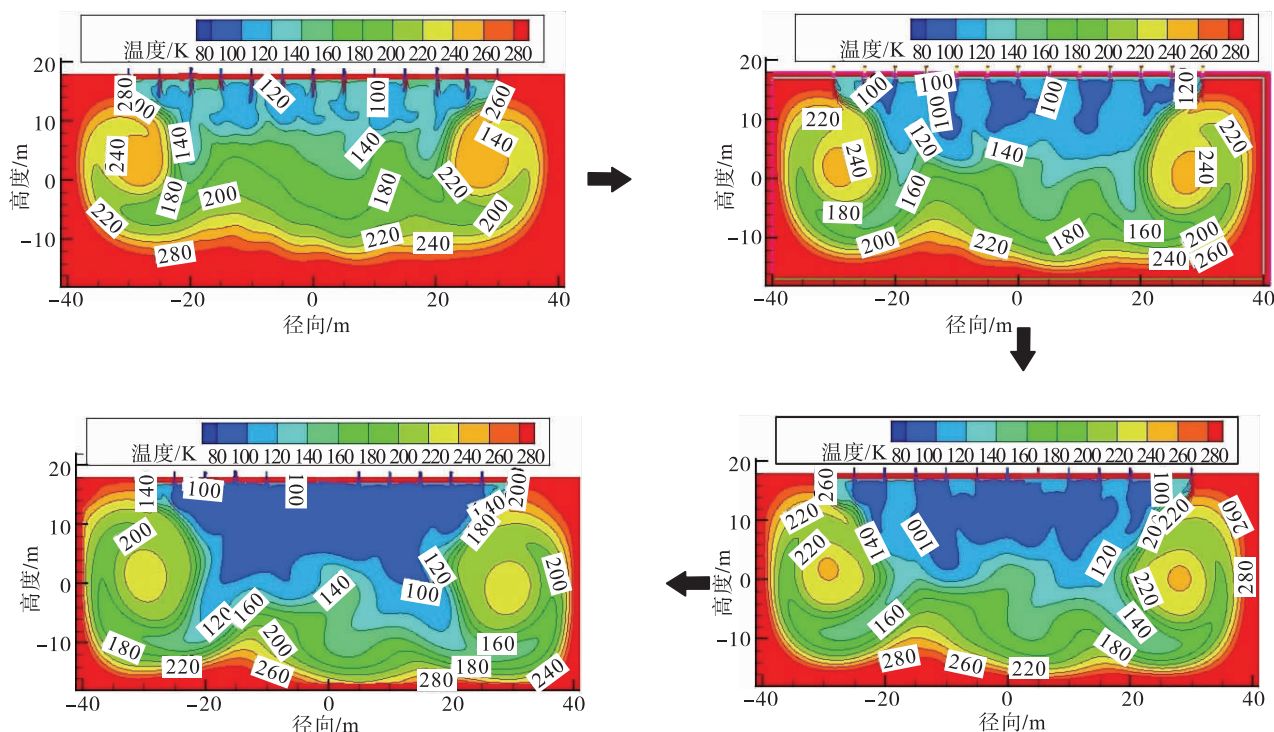


图 10 高流速 9 m/s 顶部环状喷注温度场分布变化过程

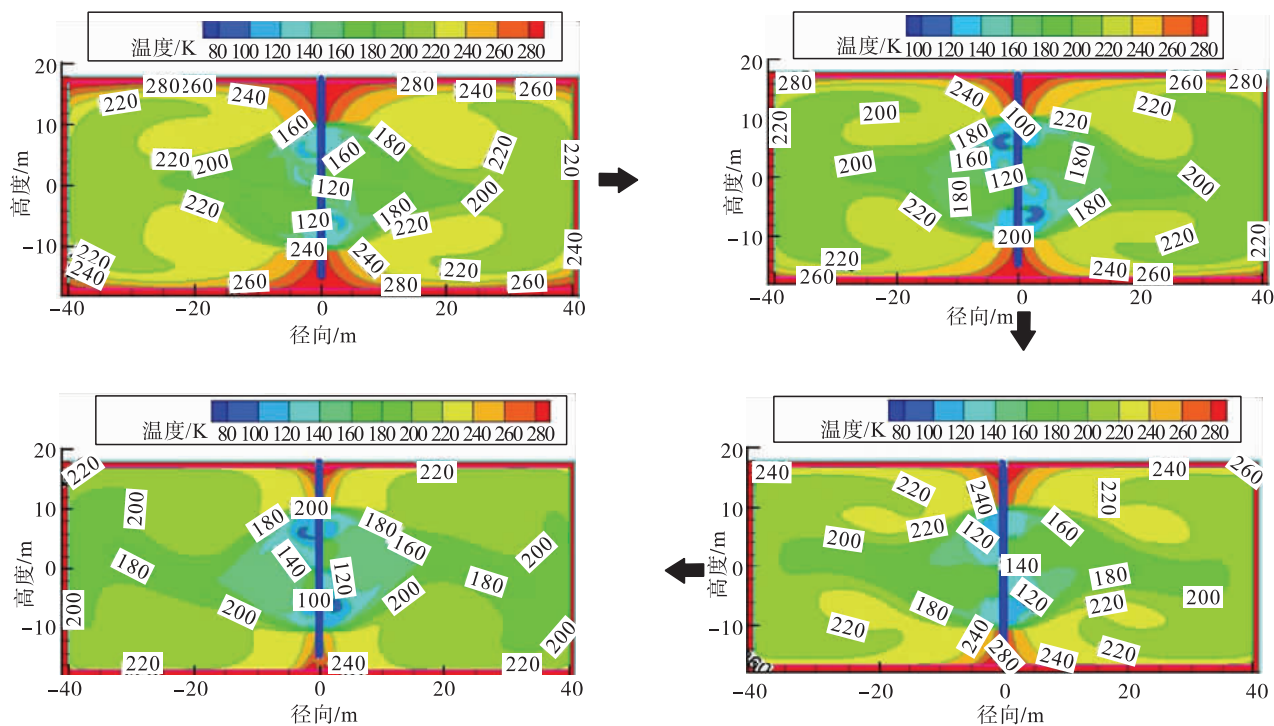


图 11 流速 5 m/s 柱状喷注温度场分布变化过程

通过对图 9 ~ 11 喷注过程温度分布变化过程分析可得:

1) 与顶部环状喷注预冷方式相比,利用柱状喷注预冷方式能使储罐内的温度层分布均匀,高温层分布明显并且均匀,不会造成储罐内壁钢材温降过快,有利于储罐冷却。

2) 喷注时喷注的速度越大,喷距就越长,喷嘴外部

速度场的扩散角度就越小,离喷嘴近处的冷量扩散则越慢,但离喷嘴远处的温阶明显。

3) 图 9 ~ 11 中都有冷量聚集,柱状喷注预冷的喷嘴个数比顶部预冷方式的少 3 个,冷量聚集不明显。

4) 图 11 中,随着喷注时间变化,温度分布基本保持最初形成的分布形状,均匀扩散,每个温度层的变化过程也与相邻的温度层变化相同。

5) 柱状喷注温度分布形成过程稳定, 这样储罐顶部、底部和侧壁同时预冷, 预冷速度一致。

6) 可尝试在喷注的开始阶段采用高速进气, 这样在早期形成较好的温阶。在喷注后期采低速进气, 这样冷量聚集, 从而保证壁面不会出现较大的温降。

7) 从设备和现场施工而言, 在顶部环状喷注安装喷嘴较多时, 费时费力且设备庞大, 使用完后撤离麻烦; 而使用柱状喷注时, 安装和撤离比较容易。

6 结论

1) 相邻热电偶之间的温差是由于储罐内温度场分布不均造成, 储罐内温度分布影响因素有冷却气体进口速度、管径和进口位置。

2) 采用顶部环状喷注预冷方式时, 温度场分布与进口速度有关, 较高的速度 ($> 7.5 \text{ m/s}$) 进口比低速进口温度场分布规则。

3) 采用柱状喷注预冷方式, 侧壁面可得到同步降温收缩, 减小由于温降不均匀造成的应力。

4) 柱状喷注预冷方式中储罐内的温度层分布更加规则均匀, 有利于储罐冷却。

5) 任何喷注方式都应合理选择进气管径和速度, 预冷管道的管径应该在 $0.1 \sim 0.3 \text{ m}$ 选取, 进气速度应该控制在大于 5 m/s 。

参考文献:

- [1] 付明宇, 李恒星. LNG 储配站的预冷[J]. 煤气与热力, 2009, 29(6): 18-21.
Fu Mingyu, Li Hengxing. Precooling of LNG Storage and Distribution Station [J]. Gas and Heat, 2009, 29(6): 18-21.
- [2] 王良军, 刘 杨, 罗仔源, 等. 大型 LNG 地上全容储罐的冷却技术研究[J]. 天然气工业, 2010, 30(1): 93-95.
Wang Liangjun, Liu Yang, Luo Zaiyuan, et al. The Cooling Techniques for Ground Large-scale Full-capacity LNG Storage Tanks [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(1): 93-95.
- [3] 成永强, 田士章, 魏念鹰, 等. LNG 接收站首座储罐冷却相关问题探讨[EB/OL]. [2014-04-4]. <http://www.docin.com/p-468390238.html>.
Cheng Yongqiang, Tian Shizhang, Wei Nianying, et al. The Discussion of the Cooling Related Matter for the First LNG Storage Tank at LNG Receiving Terminal [EB/OL]. [2014-04-4]. <http://www.docin.com/p-468390238.html>.
- [4] 马国光, 吴晓楠, 王元春. 液化天然气技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 5.
Ma Guoguang, Wu Xiaonan, Wang Yuanchun. Liquefied Natural Gas Technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 5.
- [5] 于 勇, 张俊明, 姜连田. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2012: 5.
Yu Yong, Zhang Junming, Jiang Liantian. Introduction and Advanced Course of FLUENT [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2012: 5.
- [6] 李进良, 李承曦, 胡仁喜, 等. FLUENT 6.3 流场分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 6.
Li Jinliang, Li Chengxi, Hu Renxi, et al. FLUENT 6.3 Flow Field Analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 6.
- [7] 王献俘, 熊鳌魁. 高等流体力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
Wang Xianfu, Xiong Aokui. Advanced Fluid Mechanics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004.
- [8] 顾安忠. 液化天然气技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
Gu Anzhong. Liquefied Natural Gas Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [9] 中国石油唐山 LNG 项目经理部. 液化天然气(LNG)接收站重要设备材料手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
China Petroleum Tangshan LNG Project Manager Department. The Liquefied Natural Gas (LNG) Receiving Terminal of Important Equipment and Materials Handbook [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [10] 杨世铭. 传热学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1987.
Yang Shiming. Heat Transfer [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1987.
- [11] 朱鸿梅, 孙 恒, 刘宏伟, 等. 大型 LNG 储罐角部绝热结构的温度场[J]. 油气储运, 2011, 30(1): 37-40.
Zhu Hongmei, Sun Heng, Liu Hongwei, et al. Temperature Field on Corner Adiabatic Structure of Large-scale LNG Storage Tank [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2011, 30(1): 37-40.