

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.015

# 160 000 m<sup>3</sup>大型 LNG 储罐混凝土外罐施工 全过程温度作用分析

翟希梅<sup>1</sup>, 王 恒<sup>1,2</sup>

(1.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2.中国建筑西南设计研究院有限公司, 610041 成都)

**摘要:** 为了解 160 000 m<sup>3</sup>大型液化天然气(LNG)储罐混凝土外罐在施工期间的抗裂性能,避免由于水泥水化放热、混凝土收缩、外界气温变化而造成的外罐墙壁竖向开裂及扶壁柱局部环向裂缝现象,运用有限元数值模拟技术,采用增量法,分别探讨了施工模板材料、施工质量、施工季节及混凝土入模温度对混凝土外罐温度应力分布的影响及其规律。结果显示:模板对温度应力的影响作用较小,混凝土收缩导致混凝土拉应力持续增长,温度应力随着施工季节温度的变化而产生相应波动,施工质量及施工季节对温度应力的影响较大;在上述结论基础上,视温度应力结果为水化热、混凝土收缩、外界气温及入模温度各自单一影响作用下温度应力的叠加,进而总结出各因素对混凝土施工阶段温度应力的影响规律,并提出可供实际工程参考的防裂措施建议。

**关键词:** LNG 储罐; 裂缝控制; 施工质量; 温度应力; 施工季节

中图分类号: TE872

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)06-0092-06

## Influence factors of thermal stress in the construction period of the concrete outer tank for 160 000 m<sup>3</sup> LNG storage

ZHAI Ximei<sup>1</sup>, WANG Heng<sup>1,2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 2.China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., 610041 Chengdu, China)

**Abstract:** To investigate the cracking resistance and avoid the vertical and local circumferential cracks at the bottom of the concrete outer tank during the construction period due to hydration heat, concrete shrinkage and temperature changes for 160 000 m<sup>3</sup> liquefied natural gas (LNG) tanks, using the finite element numerical simulation technology, the influence of shuttering material, construction quality, construction season and pouring temperature on cracks was figured out with an incremental method. The results show that concrete shrinkage leads to a sustained growth of concrete tensile stress, the thermal stress fluctuates according to the changing of construction temperature and construction quality and construction season have a strong inference on cracks. Based on this basis, the thermal stress is dismantled according to the effect of each influencing factor, and the whole thermal stress is the superposition of the thermal stress under single influence of hydration heat, concrete shrinkage, construction season and pouring temperature. Some suggestions on anti-cracking measures are proposed, mainly by regulating the construction season, complementally by improving the quality of construction.

**Keywords:** LNG tank; crack control; construction quality; thermal stress; construction season

天然气在能源结构中的比重越来越大,以及能源储备的需要,国内外都在兴建大型全容式液化天然气(liquefied natural gas,简称 LNG)储罐,其由预应力混凝土外罐及钢制内罐组成。在混凝土外罐建

造过程中,由于水泥水化放热以及混凝土的收缩特性,混凝土罐体开裂现象很普遍。目前国内外学者展开了大量试验与仿真研究,获得了相关大体积混凝土结构各种热力学指标,并对导致混凝土开裂的因素、规律及数值算法都有探讨<sup>[1-5]</sup>。文献[6-7]以国内某 LNG 储罐为例,介绍了混凝土外罐早期温度裂缝的有限元分析过程,但未考虑混凝土的收缩和徐变效应,且外界气温也只考虑为恒温。

收稿日期: 2014-12-21.

作者简介: 翟希梅(1971—),女,教授,博士生导师.

通信作者: 翟希梅, xnzhai@hit.edu.cn.

文献[8]利用有限元方法, 针对一实际 LNG 储罐混凝土外罐的施工建造全过程, 就混凝土外罐在施工期间的温度场及应力场进行模拟, 并对温度裂缝出现的位置及时间进行了预测(见图 1、2); 分析中所用模板为 DOKA 模板, 其面板是 18 mm 厚的胶合木<sup>[9]</sup>。

文献[8]的研究结果表明, 施工期在 5—9 月, 模拟时间为 3 600 h 条件下, 在第一浇筑段扶壁柱外侧顶部、内侧底部、墙体外侧顶部和底部, 墙体内侧顶部和底部的应力结果较大(所在位置分别为图 1 中标号 5、6、2、1、3、4 处)。图 2 的应力时程对比显示, 混凝土收缩对温度应力的影响很大, 导致混凝土拉应力的持续增长; 拆模后由于外界气温的变化, 储罐外壁有幅值为 1 MPa 的波动。本文将在上述研究基础上, 探讨施工中所用的模板材料、施工质量、施工季节及入模温度等因素对裂缝产生的影响规律, 并根据分析结果, 总结出抗裂措施建议, 为同类工程实际施工提供参考。

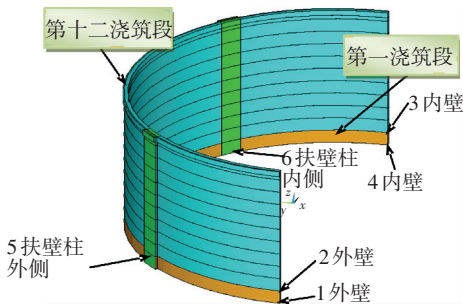
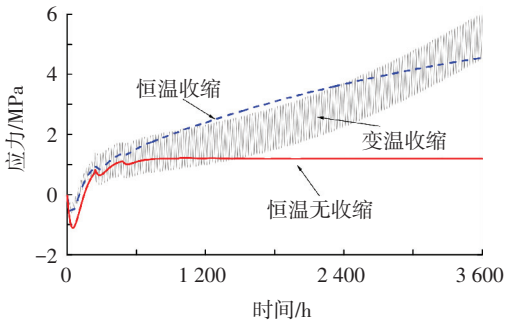
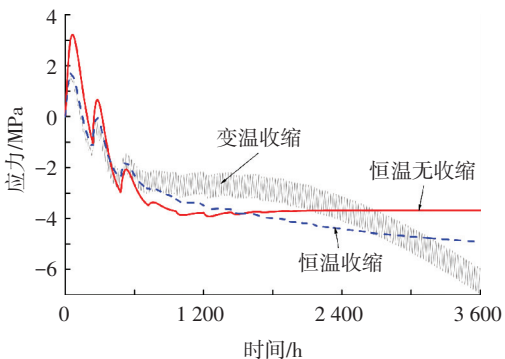


图 1 应力结果提取位置



(a) 外侧底部环向应力时程



(b) 内侧底部扶壁柱处竖向应力时程

图 2 应力时程

## 1 LNG 混凝土外罐施工阶段温度应力计算

LNG 混凝土外罐施工期间, 其早期混凝土的状态参数是随时间变化的, 某一时刻  $t$  的温度应力不仅与  $t$  时刻的温度有关, 还与  $0 \sim t$  各个时刻的温度、混凝土的凝结状态等有关, 因此  $t$  时刻的温度应力应为  $0 \sim t$  时刻应力累加的结果<sup>[10]</sup>。为此, 本文利用 ANSYS 有限元分析平台, 采用增量法并考虑混凝土的松弛系数来求解大体积混凝土早期温度应力, 即将节点温升值作为荷载, 计算出 LNG 储罐结构位移与应力的增量。在后处理模块中, 将应力增量乘以松弛系数, 并将  $0 \sim t$  时刻的各增量叠加起来, 即得到  $t$  时刻温度应力结果。其中时间增量取 1 h。

混凝土线膨胀系数取  $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ , 泊松比取 0.18, 密度取  $2\,400 \text{ kg/m}^3$ <sup>[11]</sup>。混凝土的弹性模量采用复合指数式<sup>[12]</sup>:

$$E_{(t)} = E_{c0}(1 - e^{-at^b}), \quad (1)$$

式中:  $t$  为龄期;  $a, b$  为常数,  $a = 0.40, b = 0.34$ ;  $E_{c0}$  为  $t \rightarrow \infty$  时混凝土的弹性模量。

考虑到非预应力钢筋率影响, 混凝土的弹性模量  $E'_{(t)}$  为

$$E'_{(t)} = \rho E_s + (1 - \rho) E_{(t)}, \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为非预应力钢筋配筋率,  $E_s$  为非预应力钢筋弹性模量。

采用应力松弛系数来考虑混凝土的徐变<sup>[13]</sup>, 应力松弛系数为

$$K_r(t, \tau) = 1 - (0.2125 + 0.3786\tau^{-0.4158}) \times \{1 - \exp[-0.5464(t - \tau)]\} - (0.0495 + 0.2558\tau^{-0.0727}) \times \{1 - \exp[-0.0156(t - \tau)]\}. \quad (3)$$

式中:  $t$  为计算时刻的混凝土龄期,  $d$ ;  $\tau$  为混凝土受荷时的龄期,  $d$ ;  $(t - \tau)$  为持荷时间,  $d$ 。

## 2 模板对结构温度应力的影响

将文献[8] 18 mm 厚胶合木模板(导热系数  $0.837 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ , 比热  $1.8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ <sup>[14-15]</sup>) 替换为 5 mm 的钢模板(导热系数  $258 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ , 比热  $0.48 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ )<sup>[16]</sup>, 施工期仍为 5—9 月。图 3 是使用钢、木模板时的应力时程对比, 可发现使用钢模板时罐壁各处的应力结果较使用木模板时有小幅降低, 在模拟时间第 3 600 h 的降幅稳定在 0.5 MPa 左右。可见, 钢模板对 DOKA 模板的替换虽然使 LNG 储罐混凝土外罐最不利位置的应力有所降低, 但幅值很小, 罐壁及扶壁柱处仍存在开裂现象。

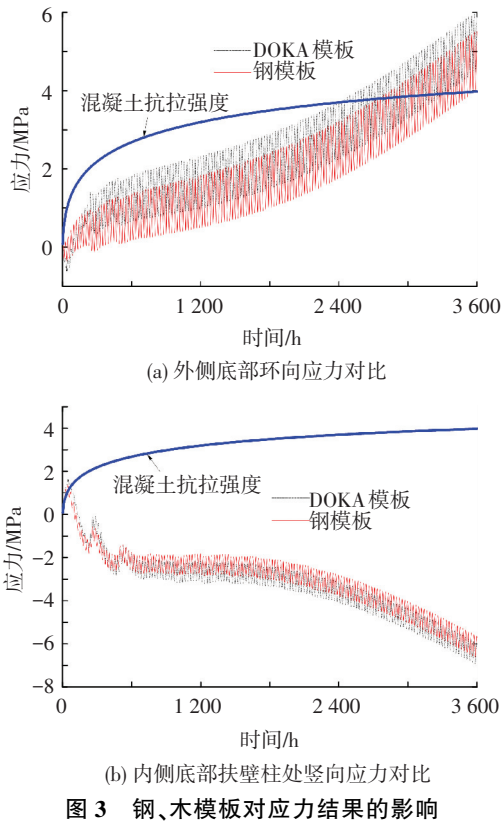


图 3 钢、木模板对应力结果的影响

### 3 施工质量对结构温度应力的影响

混凝土收缩对温度应力的影响很大<sup>[8]</sup>,而施工质量(包括养护条件、水灰比、骨料配比、振捣等)将对混凝土收缩起重要作用,因此可通过提高施工质量来控制混凝土的收缩,混凝土收缩可表示为<sup>[17]</sup>

$$\varepsilon_y^\tau = \varepsilon_y^0 \cdot M_1 \cdot M_2 \cdots M_n (1 - e^{-c\tau}), \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_y^\tau$ 为任意时间的收缩值,时间 $\tau$ 以d为单位; $c$ 为经验系数,取0.01; $\varepsilon_y^0$ 为标准状态下的极限收缩值,本文取 $3.24 \times 10^{-4}$ ;  $M_1, M_2, \dots, M_n$ 为考虑各种非标准条件的修正系数,标准状态下取 $\prod_1^n M_i = 1$ <sup>[17]</sup>.

施工期仍设置在5—9月,但施工时通过提高施工质量以降低外罐混凝土的收缩值,即水灰比采用0.25(标准状态时水灰比为0.4),此时修正系数 $M_4$ 取0.75<sup>[17]</sup>;同时采用蒸汽养护(标准状态为自然硬化),此时修正系数 $M_9$ 取0.85<sup>[17]</sup>,在上述两项措施下: $\prod_1^n M_i \approx 0.6$ ,相当于对混凝土的收缩予以40%的折减。

图4为收缩值降低40%后LNG罐体的混凝土应力时程,结果显示:提高施工质量后,在施工时间3600h时,罐壁及扶壁柱处混凝土应力值降低明显,相当于混凝土收缩不折减情况的60%。

### 4 施工季节对结构温度应力的影响

为了探讨外界气温变化对温度应力的影响,将

计算模拟的时间延长到8400h(350d),接近气温变化的1a周期。图5(a)是施工期间的日平均气温变化曲线;图5(b)是各浇筑段墙壁内部一点的温度时程;图5(c)是外侧底部环向应力时程和内侧底部扶壁柱处竖向应力时程。由图5可得出最直观的结论就是混凝土环向应力变化曲线的凹凸与温度变化曲线的凹凸刚好相反,而竖向应力变化曲线的凹凸与温度变化曲线的凹凸一致。

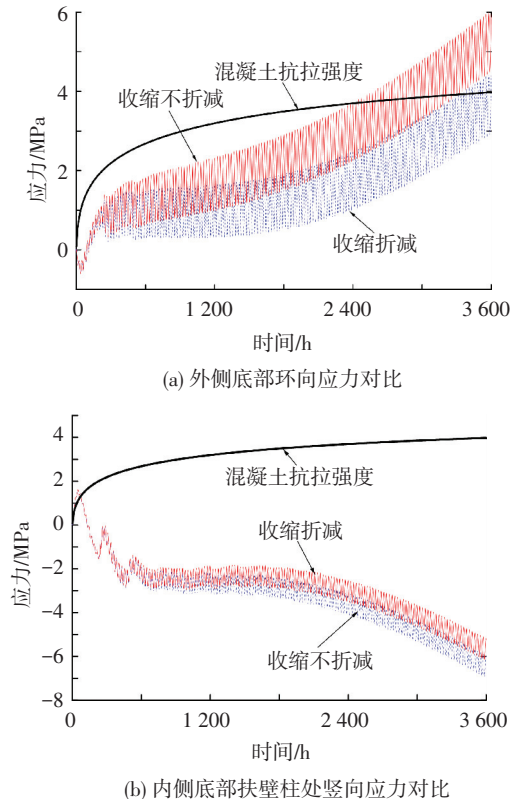
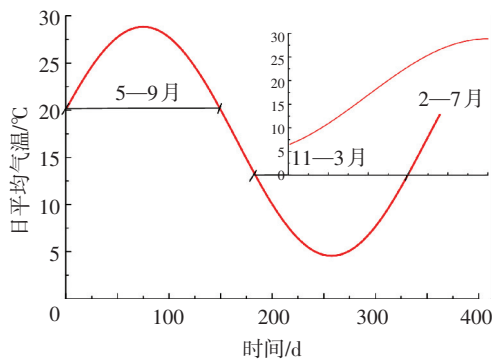


图 4 施工质量对温度应力的影响

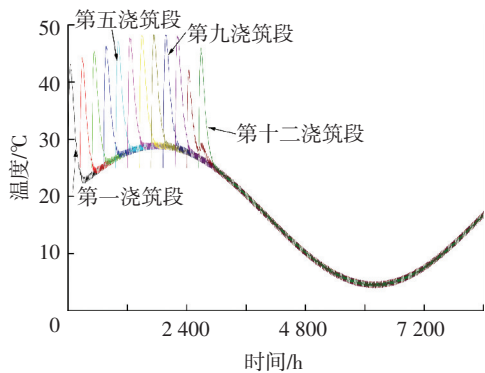
鉴于气温变化对温度应力的明显影响作用,本文考虑通过调整施工期来控制裂缝的产生。分3种季节情况:1)施工期为5—9月,入模温度为25℃;2)施工期为2—7月,入模温度为20℃;3)施工期为11—3月,同时考虑提高施工质量(即对收缩值折减40%),入模温度为10℃。上述入模温度的确定是根据施工期间的平均气温水平设定的。不同季节下的结构应力计算结果见图6。

为清楚了解外界气温对温度应力的影响,需要将图6的结果同图2中恒温考虑收缩条件下的应力曲线作比较。外界气温的变化导致混凝土的收缩与膨胀,由于收缩与膨胀受到约束而产生应力。在罐体的环向,外界气温降低时混凝土发生收缩,罐壁会产生环向拉应力;外界气温升高时混凝土发生膨胀,罐壁会产生环向压应力,即表现为图6(a)中的环向拉应力曲线的凹凸与日平均气温变化曲线的凹凸相反。在罐体的竖向,可将罐体墙壁简化成悬臂结构,上部混凝土结构的收缩与膨胀变形,对于下部混凝

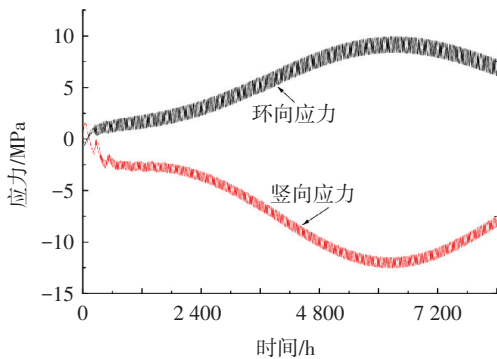
土就如同外荷载作用, 当外界气温降低时上部混凝土收缩, 罐体内侧产生压应力, 外侧产生拉应力; 当外界气温升高时上部混凝土膨胀, 罐体内侧产生拉应力, 外侧产生压应力, 表现为图 6(b) 中的内侧底部扶壁柱处竖向应力曲线的凹凸与日平均气温变化曲线的凹凸一致. 综上所述, 混凝土环向应力变化曲线的凹凸与温度变化曲线的凹凸刚好相反, 而竖向应力变化曲线的凹凸与温度变化曲线的凹凸要么一致, 要么相反, 视具体位置而定.



(a) 350 d 内的日平均气温变化



(b) 各浇筑段墙体内部一点的温度时程

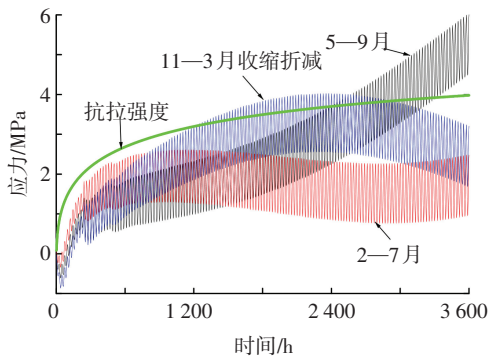


(c) 历时 8 400 h (350 d) 的应力时程

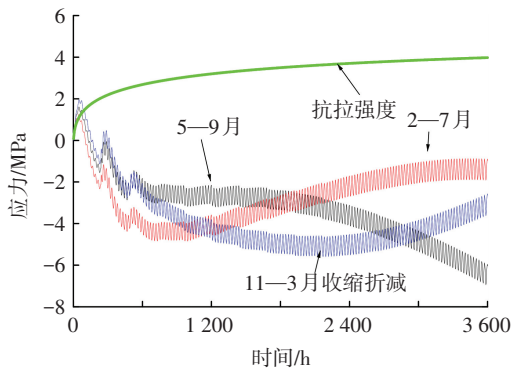
图 5 历时 8 400 h (350 d) 的应力时程

本文三组施工季节中, 从应力时程与混凝土抗拉强度的对比出发, 发现施工期设置在 2—7 月时, 只有储罐罐体内侧底部扶壁柱处的早期竖向应力较大; 而施工期设置在 11—3 月时, 即使采取降低混凝土收缩量的改善措施, 储罐罐壁外侧底部环向应力也在较早的时间就超过抗拉强度, 出现开裂. 因此本文认为合理安排施工季节对 LNG 储罐混凝土外罐

温度应力的控制最为明显; 提高混凝土的浇筑质量, 控制混凝土的收缩, 对控制裂缝的产生是有局限性的; 合理利用施工期间外界气温的升温来抵制混凝土的收缩影响时 (2—7 月施工), 没必要再提高混凝土的施工质量, 即可控制裂缝的产生; 当施工后期处于降温期 (5—9 月施工), 可以利用提高浇筑质量, 减少收缩来控制混凝土开裂 (如图 4(a) 所示, 收缩折减后, 环向应力降低); 当施工前期处于降温段 (11—3 月施工), 此时应力受混凝土收缩的影响较小, 即使控制施工质量, 降低了混凝土的收缩, 也不能很好起到防裂作用. 施工期可以理解为从开始施工到预应力张拉结束的这一段时间.



(a) 环向应力对比 (罐壁)



(b) 竖向应力对比 (扶壁柱)

图 6 不同施工季节的应力时程

## 5 混凝土入模温度对结构受力的影响

将混凝土刚入模的状态视为混凝土的初始状态, 则入模之后外界气温与入模温度的差值决定混凝土的收缩与膨胀. 以施工期间第 150 d (即第 3 600 h) 的应力值进一步说明: 5—9 月施工期间第 150 d 的外界日平均气温值为 20 °C, 比入模温度 25 °C 低, 等价于浇筑 150 d 后的混凝土会产生收缩, 致使罐体产生环向拉应力, 图 7(a) 中的 5—9 月第 150 d 的拉应力平均值比恒温 25 °C 条件下第 150 d 的拉应力值大 0.75 MPa; 2—7 月施工期间第 150 d 的外界日平均气温值为 28 °C, 比入模温度 20 °C 高, 等价于浇筑 150 d 后的混凝土会产生膨胀, 致使结构产生环向压应力, 图 7(b) 中的 2—7 月

施工期第 150 d 的拉应力平均值比恒温 25 ℃ 条件下第 150 d 的拉应力值小 2.75 MPa(施工模拟后期 150 d 时混凝土的弹性模量大致在 20~30 GPa,线膨胀系数  $1 \times 10^{-5} / \text{℃}$ ).另外,入模温度需尽量与施工期间的气温接近,以降低施工成本.

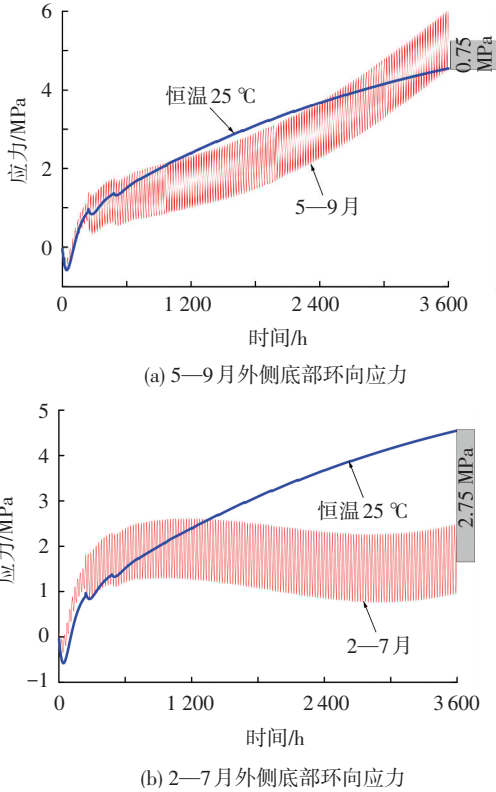


图 7 入模温度对温度应力的影响

## 6 LNG 储罐外罐混凝土施工阶段温度作用的影响因素分析

对于施工 600 h 以前的温度应力归因于水泥水化放热;而 600 h 以后的温度应力归因于混凝土收缩、外界气温及入模温度,其影响关系见图 8.图 8(c)显示 600 h 后收缩导致温度应力持续增长,但增长曲线斜率逐渐降低;图 8(b)中外界气温及入模温度导致温度应力呈  $A \sin(\omega t + \varphi) + B$  曲线变化(该图中温度应力曲线只为示意图形),其中  $A \sin(\omega t + \varphi)$  项由外界气温变化(施工季节)决定,其曲线变化趋势规律如第 3 节所述,而入模温度决定气温作用导致的温度应力的零应力值的位置(即常数项  $B$ ):外界气温大于入模温度时,产生压应力;外界气温小于入模温度时,产生拉应力.由图 8(a)、(b)的对比可知,可以通过调节施工时间段(即正弦项的相位  $\varphi$ ),使外界气温在施工前期处于升温状态,这样可将峰值应力的出现时间往后推,有利于控制裂缝的产生,因为经历的时间越长,混凝土的抗拉强度越高,同时后期预应力筋的布置可有效控制峰值拉应力,使其低于抗拉强度.

降低 LNG 储罐混凝土外罐施工期间拉应力的具体建议:(1)调整施工时间段,利用施工期间外界气温的逐渐提高来削弱混凝土收缩作用产生的拉应力增长;(2)如果施工期受限制,可提高养护质量,降低混凝土的收缩作用;(3)混凝土入模温度需考虑入模温度与施工后期气温的差值,如果施工后期气温处于下降段,则此差值宜为负.同时,入模温度的确定还需与施工期间的气温相宜,以降低施工成本.

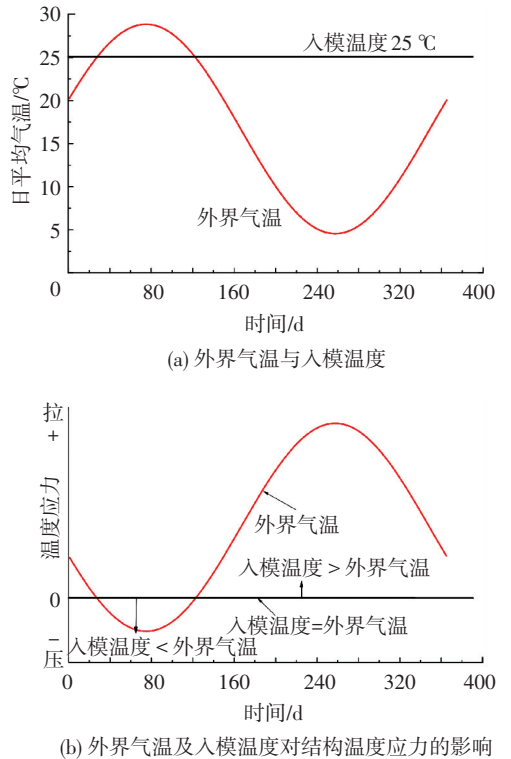


图 8 温度应力影响因素分析

## 7 结 论

- 1) 模板材料对储罐结构温度应力影响作用较小.
- 2) 可通过调整施工时间段,利用外界气温的逐渐提高来降低混凝土收缩的不利影响.如果施工期有限制,可采取提高养护质量等措施,以降低混凝土的收缩作用.
- 3) 入模温度的确定需考虑入模温度与施工后

期的气温差值,如果施工期的后期气温处于下降段,则此差值宜为负.同时,入模温度还需与施工期间的气温相宜,以降低施工成本.

4) 罐体内侧底部扶壁柱处的早期竖向应力,与混凝土的温升值和混凝土内外温差有关,而这两个温度值是负相关的,且任意一值较大都会导致较大的竖向拉应力致使开裂,为此,可采取局部分段施工来防止其开裂.

## 参考文献

- [1] BROOKE J J, AI-KAISI A F. Early strength development of protoand and slag cement concrete cured at elevated temperature [J]. *ACI Material Journal*, 1990, 89(10): 503-507.
- [2] EMBORG M, BERNANDER S. Assessment of risk thermal cracking in hardening concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120(10): 2893-2911.
- [3] CERVERA M. Thermo-chemo-mechanical model for concrete: hydration and aging [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1999, 125(9): 1018-1027.
- [4] 肖明. 温变效应对大体积混凝土结构的损伤开裂分析[J]. *水力发电学报*, 1997, 57(2): 8-18.
- [5] 朱伯芳. 不稳定温度场数值分析的分区异步长解法[J]. *水利学报*, 1995, 26(8): 46-52.
- [6] 王春. LNG 储罐混凝土外罐早期温度裂缝分析[J]. *低温建筑技术*, 2009(11): 119-120.

- [7] 吴浩,卢云祥. 上海 LNG 储罐外罐的建造方案研究[J]. *中国水运*, 2008, 8(1): 138-139.
- [8] 翟希梅,王恒,周庆生,等. 大型 LNG 储罐混凝土外罐施工期间温度裂缝预测[J]. *石油学报*, 2013, 34(4): 780-786.
- [9] 严跃兰,姚德新. 广东天然液化气接收站 DOKA 模板施工技术[J]. *工程质量*, 2005, 11(5): 27-29.
- [10] 关战伟. 基于 ANSYS 平台增量法求解大体积混凝土早期弹性徐变温度应力[J]. *水科学与工程学报*, 2008(增刊2): 83-85.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [13] 吴胜兴,周氏. 大体积混凝土温度应力松弛系数的优化确定[J]. *河海大学学报*, 1993, 21(2): 47-53.
- [14] 黄潇,庞培培,刘艳. 混凝土结构中水化热产生温度应力的仿真分析[J]. *安徽建筑工业学院学报(自然科学版)*, 2010, 18(3): 23-26.
- [15] 刘唤. 大体积混凝土温度裂缝的仿真分析及其控制[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- [16] 陈长华. 考虑钢筋作用的水工结构施工期温度场与温度应力分析[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [17] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 20-25.

(编辑 赵丽莹)

## 近期结构工程类会议简讯

1. 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第 15 届学术交流会暨教学研讨会 (ISSF-2016) 将于 2016 年 8 月 18—21 日在云南省昆明市举行. 会议由昆明理工大学和贵州大学联合承办. 本次会议将集中研讨近两年在钢结构基础理论研究、工程应用实践和教学改革方面取得的新成就和新进展.

2. 国际壳体与空间结构协会 2016 年年会 (IASS-2016) 将于 2016 年 9 月 26—30 日在日本东京举行. 会议由东京大学承办. 本次会议以 "Spatial Structures in the 21st Century" 为主题, 将针对在役空间结构维护、21 世纪全球变暖、气候变化引起的空间结构问题等方面展开讨论.

3. 第十四届结构工程国际研讨会 (ISSE-14) 将于 2016 年 10 月 12—15 日在北京举行. 会议由国家自然科学基金委员会主办, 北京交通大学承办. 会议以展示学者、研究人员和广大结构工程技术人员最新研究成果为宗旨, 交流结构设计与分析、建造与维护管理, 及防灾减灾等方面的信息, 研讨新工艺和新技术在社会基础设施的安全和可持续发展中的应用.

4. 第十六届空间结构学术会议将于 2016 年 10 月 24—26 日在杭州举行, 会议由浙江大学承办. 会议将突出 "创新与可持续发展的空间结构" 这一主题, 议题包括所有与空间结构领域理论和实践有关的方面, 如: 创新与可持续发展, 计算机信息技术, 健康监测和检测, 绿色建筑等.

5. 欧洲膜结构学会会议 (TensiNet-COST Action TU1303 Symposium 2016) 将于 2016 年 10 月 26—28 日在英国纽卡斯尔大学召开. 欧洲膜结构学会会议为系列会议, 第一届于 2003 年在布鲁塞尔召开, 此后分别在米兰 (2007 年)、索菲亚 (2010 年) 和伊斯坦布尔 (2013 年) 召开了第二至四届会议. 本次会议为第五届, 主题为 "新型结构皮肤", 即通过采用新型织物膜材和设计技术来实现结构的可持续性和高效性.