

# 混凝土储油罐低温荷载模型试验

基金项目：教育部985学科建设基金资助项目 (BHB985-1-4)

黄达海，刘敏敏，杜彦凯

(北京航空航天大学土木工程系，北京 100083)

**摘要：**为了解混凝土储油罐在温差作用下的温度传播规律，进行了低温荷载模型试验。试验结果表明：加载初期储罐内外表面温差较大且分布很不均匀，是罐壁产生较大温度应力的危险时间段。采用过渡层模拟加载液体与模型内表面的温差，进行有限元计算，计算结果与试验结果相符。采用有限元法，计算原型混凝土储油罐低温储油时的温度场，进而对储油罐的设计和施工提供参考依据。

**关键词：**混凝土储油罐；模型试验；温度场；有限元计算

**中图分类号：**TU528.57 TE972.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-2206(2007)02-0010-04

## 0 引言

随着能源消耗的不断增长，我国对石油的依赖度迅速增加，为了提高应对战争等突发事件的能力，建立战略石油储备体系势在必行。地下混凝土储油罐储量大、占地少，而且具有很好的安全性、稳定性和耐久性，符合我国的国情，可以很好地满足战略石油储备的要求。在法国、日本等国地下混凝土储油罐已得到成功应用，而我国在这方面的研究还较少。为了提高我国战略石油储备的能力和水平，对地下混凝土低温储油罐的受力性能进行研究是十分必要的。

地下混凝土储油罐的受力状态非常复杂，除了承受内部油压、外部土压、结构自重、上部荷载的作用外，还要承受很大的温度应力。计算结果表明，混凝土的拉应力主要是温度应力<sup>[1]</sup>。温度分布直接影响罐壁温度应力的大小及分布，特别是储油前期，温度沿壁厚分布极不均匀，是产生温度应力较大的时刻。因此，进行模型试验，分析罐壁温度传播规律非常必要。

### 1 模型选取与制作

储油罐温度应力数值计算结果显示，罐体所受拉应力主要出现在罐壁上，罐底受力相对较小。试验模型设计时对储油罐进行了简化，忽略罐底对罐壁温度分布的影响，取一段高度的罐壁为试验原型。另外，考虑油罐模型在其他荷载试验中的需

求，为保证模型的统一，在试件两端设置了加载头。试验模型的内径 900 mm，罐壁厚 100 mm，有效高度 300 mm，加载头高度 150 mm，模型截面尺寸如图 1 所示。试验模型采用素混凝土结构，混凝土强度为 C25<sup>[2]</sup>。

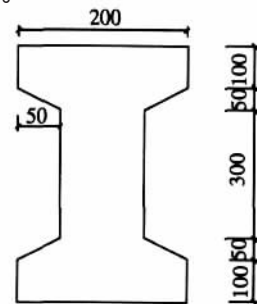


图1 试验模型截面及尺寸

## 2 模型加载与温度测量

### 2.1 加载装置

模型加载由 DWHX-1 型低温环境实验系统完成，该系统可安全控制的调温范围为 -40 ~ 60 。装置中冷冻水管为 G40 热镀锌水管 2 根，并在管外做 30 mm 厚的保温层，在出水口安装了一测温点，测温信号引入控制机房，用来调控低温加载液体的温度。低温试验装置如图 2 所示。通过往模型试件内部灌注低温循环液体，实现内外壁初始温差 30 ，并保持低温加载液体温度不变。模型内表面直接与低温液体接触，外表面直接与空气接触。本次试验，试件环境初始温度为 22.5 ，低温加载液体

保持温度为-7.5 。模型试件上部用棉被保温，减少非径向上的热量传递。

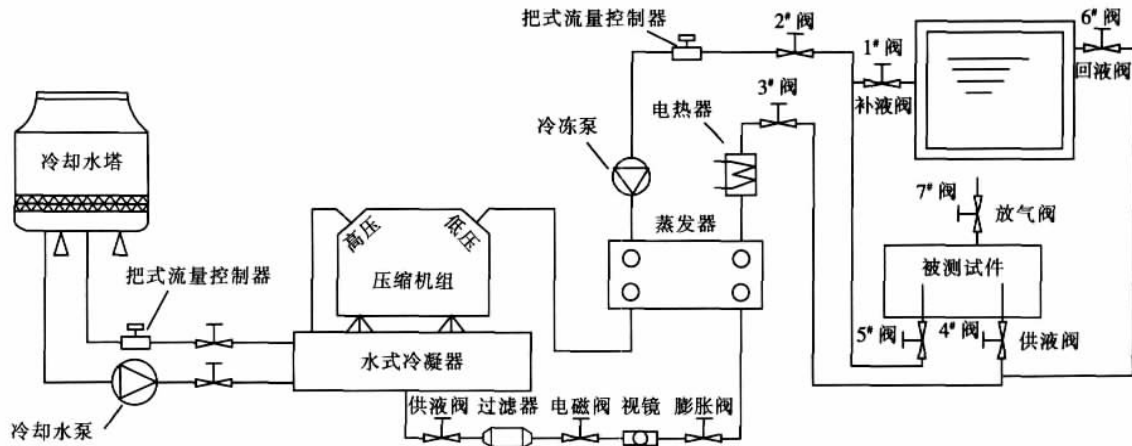


图2 低温试验装置

2.2 温度测量

试验布置了 10 个测点（如图 3 所示），分别测量模型内表面附近低温液体 A、内表面、距内表面 20 mm 处 B、45 mm 处 C、62 mm 处 D 和外表面 6 个测位的温度，其中 B、C、D 测位分别设置两个测点。试验选用铂电阻测量温度，计算机采集记录各测点温度。罐体内外表面直接与液体或空气相接触，为保证测量温度值准确，在罐体内外表面的测温点钻一个很浅稍微倾斜的小洞，将测温探头固定在小洞位置，并用胶体封堵住洞，洞口很浅，可将测量温度近似认为罐内外表面温度。

3 试验过程及结果

试验前，将加载液体冷至-7.5 。试验开始约 10 min，模型试件内部充满低温加载液体，之后，加载液体保持温度不变，进入循环状态，试验共进

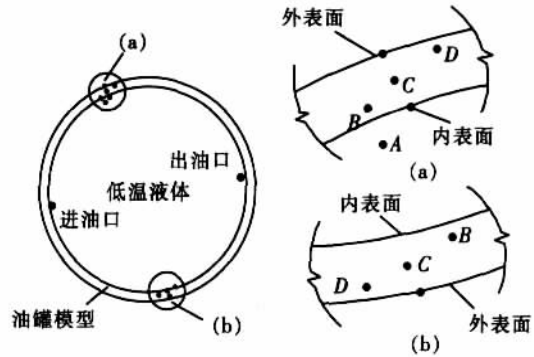


图3 温度测点布置

行 300 min。150 min 时，模型外表面有少量凝结水出现。由于模型部分位置存在小裂缝，液体外渗，试验结束时，在试件 380 ~450 mm 高度范围内，部分外表面潮湿。温度测量结果见表 1。其中 B、C、D 及外表面的温度取同测位两测点的平均值。

表1 温度测量结果 T/

测位	时间/min										
	0	10	20	30	60	90	120	150	180	240	300
A	21.77	-3.57	-7.38	-7.08	-7.96	-7.89	-7.67	-7.52	-6.94	-7.60	-7.74
内表面	22.14	3.91	-1.44	-2.91	-4.66	-5.10	-5.47	-5.69	-5.54	-5.98	-6.20
B	22.30	21.06	13.22	9.19	4.43	2.01	0.47	-0.70	-0.62	-2.31	-2.97
C	22.80	22.73	20.97	18.04	12.33	8.89	6.54	4.86	3.61	1.86	0.76
D	22.66	22.58	22.14	20.68	16.14	12.84	10.20	8.23	6.62	4.35	2.81
外表面	22.58	22.29	22.44	21.85	18.92	15.84	13.87	12.40	11.30	9.62	8.52

4 结果分析

4.1 试验结果分析

各测位温度变化过程见图 4，可知，模型内部充入低温加载液体后，内壁温度迅速降低。30 min 时，内壁与加载液体的温差缩小为 4.1 ，随后与加载液体间保持较小温差。当加载液体温度出现波动时，内表面和 B 处的温度出现波动，其他测

位的温度并无明显的异常变化。试验 20 min 时，外表面温度开始下降。各测位对低温荷载的反应随距内表面距离的增加而滞后。

温度沿壁厚分布曲线如图 5 所示。沿壁厚温度分布具有明显的时间性。试验前各测点温度基本相同，为室内空气温度。10 min 时，内表面降至 39 。30 min 时，内外表面温差达到最大值 24.76 。

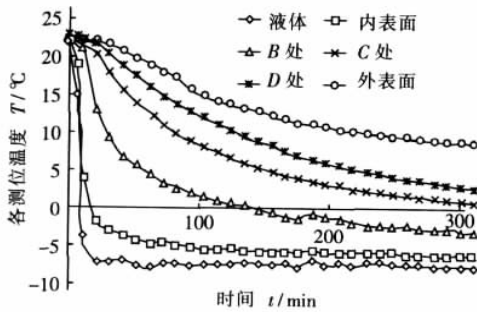


图4 各测位温度变化过程曲线

这段时间，罐壁径向内侧温度梯度很大，外侧温度梯度较小。90 min 时，温度沿壁厚基本呈线性分布，内外表面温差降至 20 。随时间推移，模型内外表面间的温差减小。在内部低温加载液体和外部高温空气的共同作用下，模型的温度分布逐渐趋于稳定。

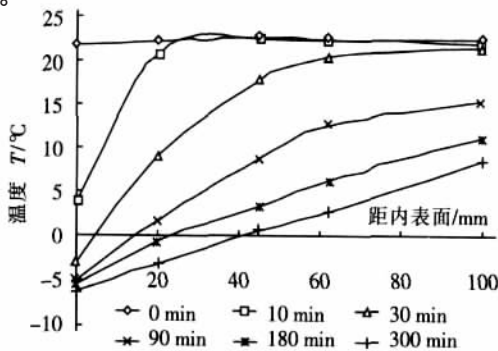


图5 温度沿壁厚分布曲线

#### 4.2 模型试验结果与有限元计算结果比较

建立同尺寸和形状的计算模型进行温度场数值模拟。流动的加载液体与模型内表面间的热量传递为对流换热，对流换热系数的大小与流体的黏性、流动状态、流体有无相变、换热表面的粗糙程度等因素有关。本次试验加载液体为乙二醇水溶液，流速为 35.49 m/h，试验过程中液体无相变，混凝土试件内表面有少量的凹槽，深度约为 0.1 ~0.2 mm。由试验结果可知，加载液体与模型内表面存在一定的温差。有限元计算时，在模型内侧增加 8 mm 厚的混凝土过渡层，用于考虑加载液体与模型内壁间的温差，同时忽略由于换热引起的加载液体温度的变化。

计算时，加载液体温度直接附值在加厚了的计算模型内表面上，用 20 min 的时间从初温 22.5 线性降至 -7.5 。环境空气温度取定值 22.5 ，模型外表面与空气间的热量传递为对流换热。结构和荷载均为中心对称，可简化计算，取 1/12 (即

30 ) 罐体作为有限元计算模型，见图 6，热单元采用 SOLID70。在径向上，增加的 8 mm 厚混凝土划分为 2 个单元，模型壁厚方向划分为不等的 13 个单元，内部单元较小，外部单元较大。模型共有 6 656 个节点，5 400 个单元。

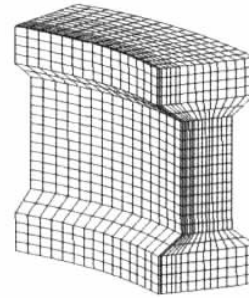


图6 有限元计算模型

各测位温度计算值与测量值比较见图 7。由图 7 可以看出，有限元计算结果与试验结果符合较好。采用过渡层可以模拟加载液体与模型内表面间的温差。试验前 20 min，内表面温度计算值与测量值差别较大，主要是由于数值模拟中的线性降温与试验中的注液过程有出入，这个差别对内表面计算温度影响较大，对其他测位影响较小。20 min 至试验结束，各测位计算值与测量值的最大温差分别为内表面 0.49 ， B 处 0.51 ， C 处 0.81 ， D 处 1.03 ，外表面 0.49 。200 min 后，除模型外表面，其他测位的计算值均较测量值偏高。这是由于模型在低温液体作用下，除热传导以外，低温液体对混凝土的渗透作用也会使模型温度降低，渗透作用在有限元计算中并未考虑。

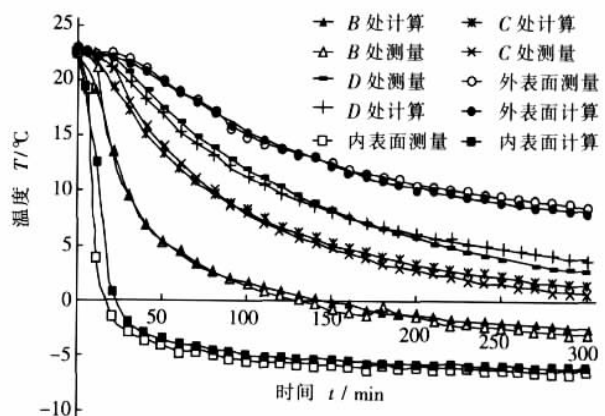


图7 各测位温度计算值与测量值比较

#### 5 原型储油罐温度场有限元计算

混凝土储油罐储油时的温度场有限元计算，考虑罐底及周围土体，以 25 万 m<sup>3</sup> 容量的储油罐为例进行计算。罐体高 50 m，内半径 40 m，外半径

41.2 m, 基础厚 2 m, 取下部地基土深度 20 m, 罐壁径向土体厚 40 m, 罐壁内侧增加 0.008 m 厚的混凝土, 用以考虑存油与罐体内壁的温差<sup>[3]</sup>。罐壁沿厚度方向等分 5 个单元。计算模型共有 66 328 个节点, 57 270 个单元。假定储油温度为定值 -40 , 罐体及外部基岩初始温度为 20 。混凝土及土体热学参数如表 2 所示。有限元计算模型见图 8。

表2 混凝土热学参数取值

材料	比热/ J/(kg· )	表面散热系数/ (W/(m <sup>2</sup> · ))	导热系数/ (W/(m· ))	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )
混凝土	920	9.44	1.44	2 300
土	1 500		0.38	1 900

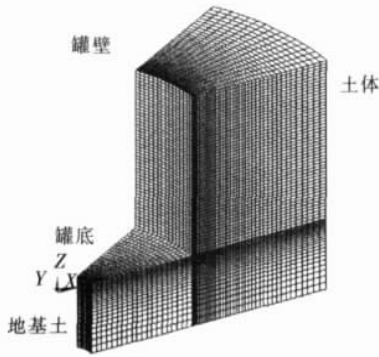


图8 储油罐计算模型

各壁厚温度变化过程见图 9 可知, 低温注油后, 内表面温度迅速降低, 2h 后降至 -1.41 , 36h 降至 -33.51 , 之后降低速度较慢。240 h 内表面温度为 -37.68 , 外表面温度在注油后 24 h 时下降 0.2 , 48 h 时才开始有明显的降温, 降幅比较稳定, 约 12 h 降低 0.8 。

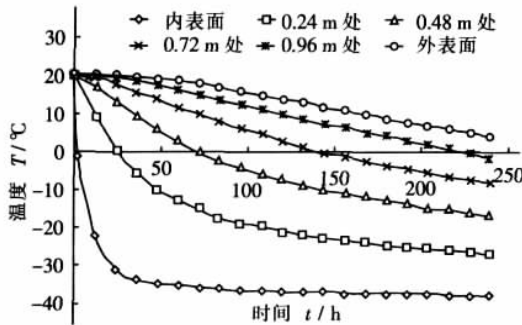


图9 各壁厚处(距内表面)温度变化过程曲线

各时刻温度沿壁厚分布见图 10。可知, 2 h 时低温对罐壁的影响深度只有 0.25 m, 12 h 时, 还不到 1 m, 48 h 时罐壁内外表面温差达到最大值, 为 53.7 。之后, 罐壁外侧降温较内侧快, 内外表面温差逐渐减小, 240 h 时温度沿壁厚分布基本成线性。罐壁温度场参数见表 3。

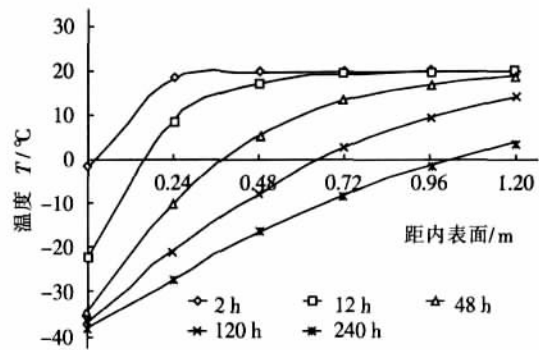


图10 各时刻温度沿壁厚分布曲线

表3 储油罐温度场参数

项目	时间 / h						
	2	12	24	36	48	120	240
影响深度/m	0.25	0.7	1.05	1.2	1.2	1.2	1.2
内外表面温差/	21.42	42.13	50.86	53.04	53.65	50.66	41.62

### 6 结束语

(1) 储油初期储罐内外表面温差较大且分布很不均匀, 是罐壁产生较大温度应力的危险时间段。工程中应设法减小储油初期罐体内外表面的温差, 可以采用对罐体内表面进行保温处理或储油前对罐体预冷等方法。

(2) 在不考虑储存液体的渗透作用对混凝土温度分布的影响时, 采用有限元计算可以得到较准确的温度场。

(3) 流体不存在相变时, 采用混凝土过渡层可以模拟液体与固体间的温差。过渡层的厚度应根据流体的黏性、流速以及换热面的粗糙程度确定。

(4) 本文假定条件下的原型混凝土储油罐, 储油 48 h 时内外表面温差最大为 53.7 , 240 h 时温度沿壁厚分布基本成线性。

### 参考文献:

[1] 黄达海, 尤旭升. 地中式混凝土油罐的数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, (3): 187- 191.  
 [2] 李忠献. 工程结构试验理论与技术(第一版)[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004. 27- 49.  
 [3] 朱秀峰, 黄秀杰, 朱秀莲. 储油罐温度分布规律初探[J]. 油气田地面工程, 2002, (5): 136- 137.  
 [4] 陈江凡, 邹华生, 龚敏. 大型液化气低温储罐结构及其保冷设计[J]. 油气储运, 2006, (7): 11- 15.

作者简介: 黄达海 (1964-), 男, 湖北荆州人, 教授, 清华大学博士(后), 主要从事混凝土徐变与断裂力学、高坝施工过程仿真等研究工作。

收稿日期: 2006- 10- 07; 修回日期: 2007- 01- 16



Bi - Monthly

Established in 1975

ISSN 1001 - 2206

CODEN SGJIE9

4348BM

Tel /Fax 8622- 66310255

Vol.33 No.2 Serial No.195 April 2007

Sponsor:China National Petroleum Corporation(CNPC)

Publisher /Editor:Research Inst. of Petroleum Eng. Technology

Address:40 Jintang Highway, Tanggu, Tianjin 300451, P.R.China

Distributor:China International Book Trading Corporation

P.O.Box 399,Beijing 100044,P.R. China

---

## CONTENTS & ABSTRACTS

### · SPECIAL TOPICS ·

#### (1) Development of Transient Liquid Phase Diffusion Welding and Its Application Prospect

YAO Kai(China University of Petroleum, Beijing 102200, China), FAN Zhen- hong, LI Yu- guo

Abstract: Transient liquid phase diffusion welding (TLP) is a new type welding technique. This paper describes the principle, the current research status at home and abroad and the application prospect of this technique. In our country TLP is just at the primary stage aiming mainly at the welding process for some dissimilar and difficult metals. The research work in foreign countries focuses on key factors related to implementing the process. There are mainly two quality inspection techniques of TLP, i.e. radiographic inspection and ultrasonic inspection. TLP has been widely applied in the technical fields of aviation, aerospace and nuclear energy as well as other fields because of its particular predominance. It has a significant developing potential in pipeline welding field.

Key words: transient liquid phase diffusion welding; principle; current status; application

#### (5) Problems of Oil Depot Firebank and Improvement

LI Qin- hua (China University of Mining, Xuzhou 221008, China), ZHU Huan- qin, FAN Bao- de

Abstract: Firebank is an important establishment of oil depot. Its structural selection and constructional quality are directly related to the security of ground storage tank farm. This paper analyzes presently existing problems of firebanks in storage tank areas and protecting walls at cave depots, which include their deployment, structure and design, the firebank- enclosed ground treatment and the facilities of water drainage and oil insulation. And based on the provisions of GB50074- 2002 " Design Criteria of Petroleum Depot " and GB50351- 2005" Firebank Design Criteria of Storage Tank Farm ", the paper offers pertinent improvement proposals.

Key words: firebank; problem; improvement proposal

### · RESEARCH & DISCUSSION ·

#### (10) Model Test of Low Temperature Loads on Concrete Oil Tank Filled with Cold Liquid

HUANG Da- hai (Civil Engineering Department of Beihang University, Beijing 100083, China), LIU Min- min, DU Yan- kai

Abstract: A model test of low temperature loads on a concrete oil tank filled with cold liquid was carried out in order to understand the rule of temperature transmittal under the action of difference in temperature on the tank. The results show that at the initial stage, the temperature difference between internal and external wall surfaces is considerable and the temperature distribution is not uniform; the initial stage belongs in dangerous time period because of the considerable temperature stresses. Transient layer approach was used in finite element method to simulate the temperature difference between the loading liquid and the model internal wall surface, and the results of calculation and test are accordant. Finite element method can be adopted to calculate the temperature field of a prototype concrete tank filled with cold oil, and furthermore it can offer references for design and construction of storage tanks.

Key words: concrete storage tank; model test; temperature field; finite element method calculation