

薄膜式 LNG 运输船温度场研究^{*}

章伟星¹ 李科浚¹ 周 昊² 柳春图³
(1.中国船级社 2.北京化工大学 3.中国科学院力学研究所)

章伟星等.薄膜式 LNG 运输船温度场研究.天然气工业,2005;25(10):110~112

摘 要 液化天然气运输船液货舱热维护系统是一个结构复杂的、具有第三类边界条件的、多层平壁的稳态导热与自然对流及辐射换热相互耦合的三维复杂传热系统。针对这一复杂系统,考虑了船体主要构件、骨材、空腔空气对流、表面间的辐射对换热的影响,建立了数学模型,并给出了基于通用软件 ANSYS 的数值计算方法;还以某艘 LNG 运输船为例,进行了温度场的有限元分析。结果表明,所给出的对 LNG 运输船液货舱热维护系统的热分析方法是有用的。

主题词 薄膜式 液化天然气 运输船 温度场 有限元分析 日蒸发率

未来几年,我国沿海各省如广东、福建、浙江等将大量进口 LNG。薄膜式液化天然气运输船(以下简称 LNG 船)是目前海上运输 LNG 的主要船型。我国目前还没有 LNG 船,因而对设计、建造、检验 LNG 船的技术研究还很少。

LNG 船不同于一般的船舶,在设计时首先要考虑它所装载的货物是-162℃的液化天然气。LNG 船在航行时,货舱内的 LNG 和外界温度的温差可达到 200℃以上,货舱热平衡状态是非常不稳定的。因此首要解决的关键问题是研究 LNG 液货舱的热交换规律,计算液货舱及其周围船体结构的温度场,以便根据温度选择船体结构钢材的钢级;然后为船体结构强度分析提供温度载荷;同时计算在运输过程中舱内 LNG 的日蒸发率,以满足《国际散装运输液化气体船舶构造和设备规则》的要求。通过对 LNG 船的液货舱及其周围船体结构的温度场分布的研究,将为我国独立研制或改进液货舱绝热维护系统打下良好的基础。

一、数学模型

1.问题描述
图 1 是一艘典型的 LNG 船的示意图,它分为 4 个独立的液货舱(Cargo Tank)。相邻液货舱之间是由平面舱壁构成的舱室(Cofferdam)。

图2是其典型横剖面,船体由内外壳组成。船

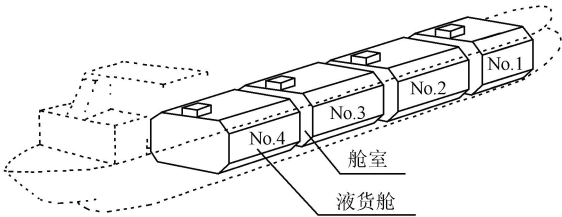


图 1 典型 LNG 运输船示意图

体内外壳和水密纵桁构成 5 个独立的封闭舱室,如图 2 中的 C1~C5。液货舱热维护层由 6 层材料组成,从里到外分别是:第一层,0.7 mm 的 INVAR 主膜;第二层,装有绝热泡沫材料的主木箱;第三层,0.7 mm 的 INVAR 次膜;第四层,装有绝热泡沫材料的次木箱;第五层,树脂;第六层,船体内壳钢板。

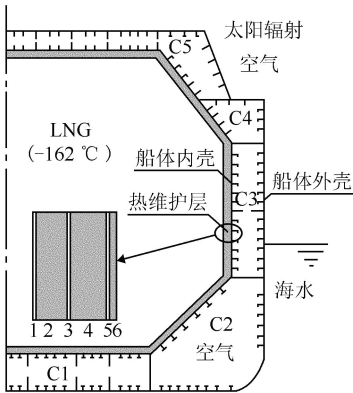


图 2 典型 LNG 运输船横剖面图

^{*} 本文属于“十五”国家科技攻关项目“大型液化天然气船关键技术研究”(2001BA402B02)研究成果。

作者简介:章伟星,1970 年生,中国科学院力学研究所博士研究生。地址:(100006)北京市东黄城根南街 40 号。电话:(010)65136633 转 474。E-mail:wxzhang@ccs.org.cn

船体的外壳水线以下部分与海水进行对流换热,水线以上部分与空气进行对流换热,同时具有强烈的太阳辐射;船体内外壳体与船体纵向桁材构成封闭的空腔,由于内外壳体的温差,存在着自然对流,同时表面之间存在着辐射;船体内壳与液化天然气之间是由多层隔热材料的热维护层。由于船舶在海上航行一般需要1个月以上的时间,故仅研究其稳态换热特性。而且在沿船长方向,结构是变化的,温度场也是变化的。因此这是一个复杂结构的、三维的、多层壁的稳态导热与自然对流换热及辐射换热相互耦合的复杂传热问题。

2. 控制方程

三维稳态热传导方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

式中: k 表示导热系数。

边界条件如下。

(1) 在与 LNG 接触的薄膜上 S_1

$$T(x, y, z) = -111.15 \text{ K} \quad (2)$$

(2) 水线以上的船体外壳体 S_2

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} = h_n (T_s - T_w) + \epsilon \sigma (T_s^4 - T_w^4) \quad (3)$$

式中: T_w 表示船体外壳板的温度; T_s 表示环境温度; h_n 表示对流系数; σ 表示斯蒂芬—玻尔兹曼常数; ϵ 表示表面发射率。

(3) 水线以下的船体外壳体 S_3

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_3} = h_n (T_s - T_w) \quad (4)$$

式中: T_w 表示船体外壳板的温度; T_s 表示海水温度; h_n 表示对流系数。

(4) 液货舱区域的各个边舱 S_4

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_4} = h_{cr} (T_s - T_w) \quad (5)$$

式中: $h_{cr} = h_n + \epsilon \sigma (T_w + T_s)(T_w^2 + T_s^2)$ (6)

(5) 双层舱壁的舱室内 S_5

同上述 4)。

二、数值计算

用数值法求解这类耦合问题,常用整体求解法,即把不同区域中的热传递过程组合起来,作为一个统一的换热过程进行求解。对于复杂结构,整体法的缺点是建模工作量大,收敛慢(可能不收敛)。在此采用分区求解、边界耦合法。计算流程见图 3。

1. 计算过程与收敛条件

首先,输入大气及海水的温度,然后假设初始钢

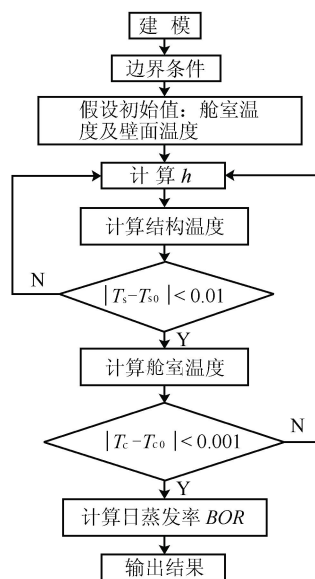


图 3 计算流程图

板温度 T_{oi} , 封闭舱室温度 T_{hoi} , 计算出对流系数 h (温度的函数), 然后计算出各船体平板及隔热材料层的温度分布 T_i 。如果船体平板温度的分布不满足公式: $\sum |T_i - T_{oi}| \leq 0.01$ (7)

则一直重复上述计算过程。在这里 T_i 时计算出的钢板温度, T_{oi} 是上一步的计算值。

以反复计算后得到的各钢板温度来计算各个舱室内的空气平均温度, 把计算后得到的数值与上一步的数值相比较, 如果舱室内空气的平均温度不满足公式: $\sum |T_{hi} - T_{hoi}| \leq 0.0001$ (8)

则重复上述过程进行计算。在公式中 T_{hi} 是新计算出的舱室温度值, T_{hoi} 是上一步的计算值。

2. 舱室温度计算

由于船体外侧的高温流体(海水或大气)和货舱内低温流体(LNG)的温度差异,引起双壳间密封空间内部空气的自然对流。由于密封空间内的体积较大,而空气和构成密封空间的船体平板之间的温差较小,所以在计算中,认为密闭空腔内的温度分布是均匀的。因此,在正常状态下,各密封舱室内空气和构成该舱室的各个钢板间的换热量始终是一定的,总热量之和应为 0,即

$$T_c = \frac{\sum h_i A_i T_{si}}{\sum h_i A_i} \quad (9)$$

式中: h_i 及 A_i 分别表示各钢板的对流系数和传热面积; T_{si} 表示各钢板的温度。

利用上式可求得舱室内空气的平均温度。

3. 辐射边界的处理

水线以上船体外表面受环境辐射,把辐射转化成对流加在表面上。实际计算表明这种做法稳定性好,大大加快了收敛速度。

4. 对流系数的计算

在分析 LNG 船的船体温度场时,双壳间的舱室存在着自然对流,因而准确计算出对流换热系数是非常重要的。对流换热系数与流体种类和温度、流速、壁面形状和温度等有关。在工程计算中有许多关于自然对流换热的实验式可供选用。求 Nusselt 数(Nu)可用下式:

$$Nu = \frac{hL}{k} \propto Ra^{-n} \tag{10}$$

式中: h 表示平均对流换热系数; k 表示导热系数;瑞利数(Ra)的求取见下式。

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \tag{11}$$

式中: β 表示体积膨胀系数; ν 表示黏性系数; α 表示热扩散率; T_s 表示壁面温度; T_∞ 表示流体温度; L 表示特性长度。

5. 骨材对换热的影响

船体结构是板梁组合结构。船体外板上有许多不同尺寸的骨材,如条钢、球扁钢、T 形材、角钢,结构十分复杂,如图 2 所示。为简化计算模型,将骨材作等效处理,即将骨材对换热量的影响等效为壁面对流换热系数的改变。

6. 日蒸发率的计算

液货舱内 LNG 和舱室的温差导致的 LNG 气化,日蒸发率可由下式计算:

$$BOR = \frac{24 \sum Q_i}{\gamma \rho V} \times 100\% \tag{12}$$

式中: $\sum Q_i$ 表示进入到液货舱内的总传热量,W; γ 表示 LNG 的蒸发潜热,Wh/kg; ρ 表示 LNG 的密度,kg/m³; V 表示液货舱的容积,m³。

三、计算实例

为验证以上研究和算法的正确性,以某艘 LNG 运输船为例进行实船计算分析。由于船体结构的复杂性,本计算采用有限元法。由于计算需要大量的迭代求解过程,所以采用 ANSYS 软件,用其宏命令 APDL(ANSYS Parametric Design Language)进行二次开发,通过宏的形式自动实现各种系数计算、循环、判断等功能,从而极大地提高了分析效率。

根据文献[4],法国 GTT 公司提供了同类船型

的试验资料,与本文方法所得的温度计算结果的比较情况见表 1,四分之一货舱换热量及日蒸发率的比较见表 2。可见两者的温度结果的差异在 0.02~2.69℃,这种差异是由于计算模型的简化和材料热物性的差别导致的,总体来看,两者温度基本一致。

表 1 温度计算结果比较表

	本文	文献[4]	绝对误差
船底外板	0.18	0.20	0.02
船底内板	-5.93	-6.60	0.67
底边舱斜板	-6.24	-5.00	1.24
舳部外板	-0.17	-0.10	0.07
舷侧内壳板	-13.50	-15.70	2.2
舷侧外壳板	-17.95	-19.40	1.45
外甲板	-19.61	-22.30	2.69
内甲板	-24.17	-26.50	2.33

表 2 换热量及日蒸发率比较表

	本文	文献[4]	相对误差
换热功率 $Q(W)$	19788	21938	9.8%
日蒸发率 $BOR(\%)$	0.076	0.081	6.2%

四、结束语

本研究细致考虑了主要构件、骨材、空腔空气对流、表面间的辐射对换热的影响,研究了 LNG 船液货舱热维护系统的温度场的分析方法。在此基础上通过对某艘 LNG 船的实船计算,获得了该船的温度场和日蒸发率。计算表明该船符合《国际散装运输液化气体船舶构造和设备规则》每天不超过 0.15%的要求。本研究成果将指导未来 LNG 船热维护系统的开发和模型试验,为我国独立研制或改进液货舱绝热维护系统打下良好的基础。

参 考 文 献

1 俞佐平,陆煜.传热学.北京:高等教育出版社,1995
2 赵镇南.传热学.北京:高等教育出版社,2002
3 ANSYS 使用手册.ANSYS 公司
4 Gas transport report . Thermal calculation of 130×10³ m³ LNG carrier .1991
5 黑丽民等.液化天然气船研究进展及其相关问题探讨.天然气工业,2002;22(3):92~95

(收稿日期 2005-08-22 编辑 居维清)