

浅谈液货船热应力计算分析

赵英策, 董炼洪

(浙江欣海船舶设计研究院股份有限公司, 浙江 舟山 316100)

摘要: 散装运输液化气体船以及在大气压力下载运液货温度大于 80℃ 的散装运输危险化学品船、油船和沥青船等船舶, 因其液货区所载货品温度与周边环境温度差异较大, 这将在液货区钢结构上产生热应力集中, 因热应力的过度集中将对船舶钢性产生极度不利影响, 故在船舶设计过程中即应对液货舱结构温度场及其热应力进行分析。本文基于 MSC.PATRAN&NASTRAN 平台, 针对液货船热应力计算过程中需注意的相关事项及作业流程进行一些简单的个人探讨。

关键词: 液货船; 热应力; 建模; 分析;

中图分类号: U662.2

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2020) 07—0076—03

1 基本概念

液货船热力学分析仅涉及稳态热传导(系统的温度场与时间无关)和空气对流换热的温度计算及热膨胀的热力计算。以下先简单介绍这些基本概念:

热应力是指温度改变时, 物体由于外在约束以及内部各部门之间的相互约束, 使其不能完全自由胀缩而产生的应力。

热传递(热传热)是物理学上的一个物理现象, 实指由于温度差引起的热能传递现象。在热传递过程中内能的改变量叫热量。它是内能的变化度量。热传递主要存在三种基本形式: 热传导、热对流、热辐射。

当物体内部存在温度差时, 热量将从高温部分传递到低温部分, 而且不同的物体相互接触时热量会从高温物体传递到低温物体, 这种热量传递方式称为热传递。热传导是固体热传递的主要方式。在气体或液

体等流体中, 热的传递过程往往和对流同时发生。傅立叶定律是热传导学中的一个基本定律, 它指出导热速率与微元所在的温度梯度成正比。并引入一个热传导率(或称热传导系数)的概念; 它是指单位温度梯度下的导热热通量, 代表物质的导热能力。物体的导热率与材料的组成、结构、温度、湿度、压强以及聚集状态等多种因素有关。一般来说, 金属的导热率最大, 非金属次之, 液体的较小, 而气体的最小。

对流是指温度不同的各部分流体之间发生相对运动引起的热量传递方式。高温物体表面常发生对流现象, 即高温表面空气受热膨胀密度降低并向上流动, 而密度较大的冷空气下降代替原来受热空气, 形成对流热交换。对流换热的基本公式是牛顿冷却公式。并引入空气对流换热系数, 它代表对流传热能力, 影响对流传热系数的主要因素有: 引起流动的原因、流动

4 结论

基于能量管理系统理论, 对船舶推力系统在不同工况下的能量管理策略进行了研究, 提出: 当船舶处于低速运行工况时, 增机指令发出阈值为 0.15Pe, 限制指令发出阈值为 0.1Pe, 减机指令发出阈值为 1.35Pe; 当船舶处于高速运行工况时, 增机指令发出阈值为 0.9Pe, 减机指令发出阈值为 1.35Pe。相关研究成果可为提高船舶电力推进系统运行效率提供参考。

参考文献:

[1] 张文保, 施伟锋, 兰莹, 顾思宇, 卓金宝. 基于层次分析—模糊综合评估法的电力推进船舶电能质量实时评估系统[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(06): 48—57.

[2] 侯淑芳, 钱威岳. 内河船舶电力推进系统的节能与环境效益评估[J]. 南通航运职业技术学院学报, 2019, 18(02): 42—46.

[3] 郭欣. 船舶电力推进系统在波浪中的功率节能与转速控制研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(24): 79—81.

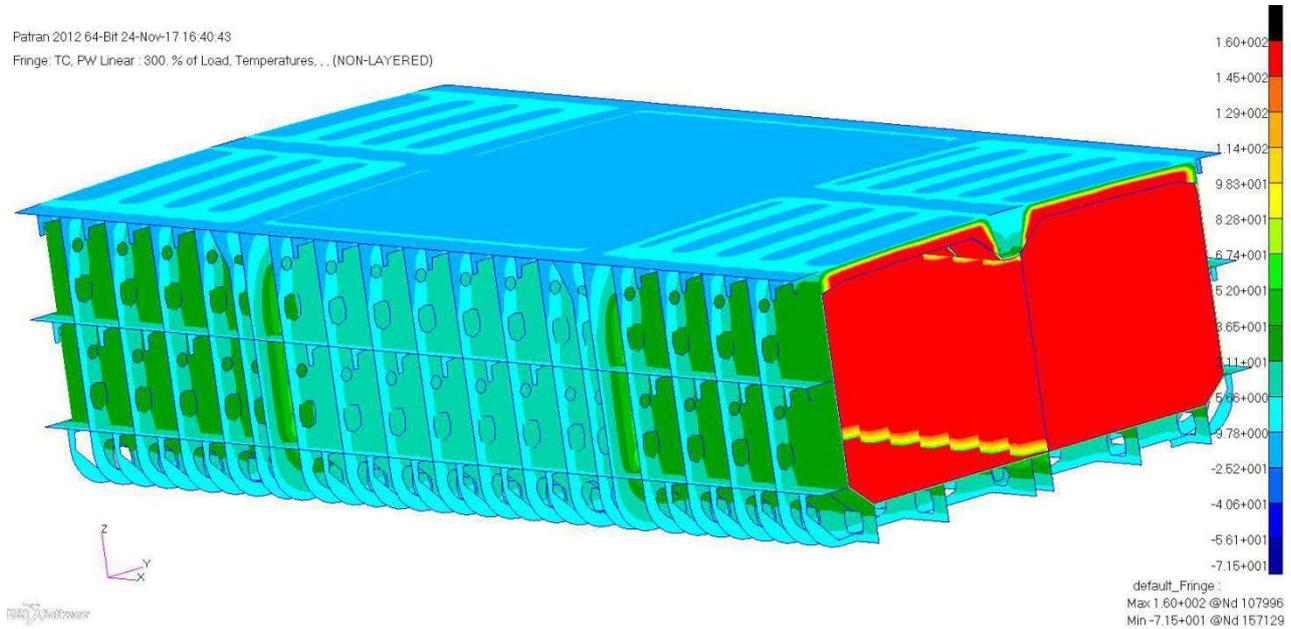
[4] 张逸峰, 王锡淮. 混合动力船舶的建模与能量管理[J]. 船电技术, 2018, 38(07): 32—37.

[5] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌, 王彬, 杨越, 刘昊天, 蔺晨晖, 王思远. 主动配电网能量管理与分布式资源集群控制[J/OL]. 电力系统自动化: 1—10[2020-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200205.1807.004.html>.

[6] 韩北川. 基于模糊控制的混合动力船舶能量管理策略研究[J]. 机电工程技术, 2019, 48(07): 84—87.

[7] 丁峰, 肖杨婷, 张少华. 船舶综合电力系统的能量管理控制系统与全数字仿真研究[J]. 船舶工程, 2018, 40(05): 46—51.

[8] 庄绪州, 张勤进, 刘彦呈, 郭洪智, 张博. 船舶全电力推进系统恒功率负载有源阻尼控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 101—109.



状况、流体性质等。

固体的膨胀系数是指固体由于温度改变 1 度所引起的长度变化与它在 0 度时的长度之比。

2 液货舱结构温度场及其热应力分析

根据 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 2 章第 24 节要求。对于散装运输液化气体船以及在大气压力下载运液货温度大于 80℃ 的散装运输危险化学品船，油船和沥青船等船舶，需按规范进行液货舱温度应力计算。并在该规范中对液货舱的热应力计算方法做出了以下具体规定。

2.1 液货舱温度应力计算

对于液货舱温度应力计算应包含两个分析流程：

流程一，即温度场计算流程。根据给定的船舶载运液货所能达的最高稳定温度和外界环境温度，通过热传导分析计算出液货舱及其相关连结构的温度场分布。

规范规定中的传热计算基于三维空间定常稳态传热假定，即系统的温度场与时间无关，且材料参数和边界条件都不随温度变化的线性热传导分析方法，并在传导计算中仅考虑结构和绝缘的传导作用。同时还规定热力学计算基于“场序热—结构耦合（sequentially coupled problem）”假定，即计及温度场变化对结构机械场产生的影响，但不考虑后者变化对前者的影响。另外，计算中不考虑结构的高温蠕变效应。在计算中，假定船体各个构件之间以传导方式进行热传递，空气仅以自然对流方式与所接触的船体构件进行对流换热。一般热传导计算可以使用通用有限元分析软件完成，如 ANSYS 或 MSC.Patran & Nastran。

流程二，使用“流程一”分析所得到的三维空间温度场分布值作为热力学计算的温度载荷，计算出温度场中任一结构由于温度梯度而引起的热膨胀（收缩）温度应力。

该流程一般也是使用有限元分析软件完成的，通常使用流程一建立的模型，通过改变分析的类型，再进一步完成结构的温度应力应变分析。

2.2 基于 MSC.PATRAN&NASTRAN 平台完成液货舱热应力的计算

第一步建模。在 Structural 分析模式下建立有限元模型，模型范围：对整体液货舱，纵向范围一般应至少覆盖船中货舱区的 1/2 个货舱 +1 个货舱 +1/2 个货舱长度。必要时（温度梯度较大），应考虑对最前一个液货舱的前端区域和最后一个液货舱的后端区域进行建模分析。对独立液货舱，至少应取整个液货舱结构。对于热传导分析，模型之中应包含模型范围内所有参与作用的热绝缘材料和结构，但可忽略不锈钢内胆。一般来讲，船体的外板结构、强框架、纵桁、舱壁，等采用 4 节点板壳单元模拟，在高应力区和应力变化梯度较大的区域应尽可能避免使用三角形单元，如减轻孔，人孔，舱壁与壁龛连接处，邻近肘板或结构不连续处，应尽量少用三角形单元。对于承受水压力和货物压力的各类板上的扶强材，肋骨和肘板等主要构件的面板和加强筋可采用梁单元模拟。船底纵桁和肋板在垂直方向布置应不少于 3 个单元。舱壁最底部的单元一般情况下应尽量划分为正方形单元。结构尺寸采用船舶建造厚度，即不考虑腐蚀余量。对于岩棉保温隔热层的单元类型一般去实体单元，厚度为绝缘层厚度（不包括不锈钢内胆），建模原则如单元选

取以及网格划分与结构类似，但在某些结构（绝缘）复杂的交汇处，如槽型纵舱壁，槽型横舱壁与顶凳相交部分等可以酌情简化。完成建模工作后需要定义材料和构件属性，此时应注意各材料系数单位与所建模型所用的单位系统的协调一致性。值得注意的是，虽然此时处在热传导分析的流程，但是一般不在 Thermal 模式下完成建模，因为在 Thermal 模式下不能创建具有剖面特性的偏心梁单元。

第二步热分析。转入 Thermal 模式进行热分析，定义材料的热参数，修改单元属性，其中梁单元还要输入剪切面积。因此在 Structural 模式下创建梁单元起名字的时候最好能明确型材的结构尺寸。规范要求的热传导分析所需的材料参数列举如下：

碳钢的热传导系数： $60.6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ——用于传热计算（温度分析）

碳钢的线膨胀系数： $11 \times 10^{-6} 1/\text{K}$ ——用于热应力计算（结构分析）

空气的对流换热系数： $11.6\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ——用于传热计算（温度分析）。

完成材料属性的调整后，就可以对有限元模型施加温度边界条件了。根据规范要求，具体边界条件按照下述要求设置：

（1）外界大气和海水的温度边界条件为：位于吃水线以下部分——定义的表面温度为水中的最低温度，如拟驶航线可能结冰，则应取 0°C ；位于吃水线以上部分——定义的表面温度为拟驶航线中的大气环境可能达到的最低温度，如 -20°C 等；

（2）对于计算最大温度应力的传热分析，应按液货温度与营运航线上外界环境温度的最大温差值作为温度载荷输入条件；

（3）对液货舱绝缘层或裸露的结构壳板直接接触液货的一面——定义的表面温度为液货载运时所能达到的最高稳定温度；

（4）对于双层底和双舷侧之间的空间——该空间的环境温度可直接取值为略高于外界温度，并在内舷侧壳板和内底板的外侧表面（背向液货一面）定义上述空气与钢板的对流传热设定（假定空气的热传导非常小），也可将该空间划为空气单元的三维有限元模型，且一并计入传热有限元模型。但通常在热传导计算中，不考虑空气的热传导作用。若对液货舱周界的最高温度指标有特殊要求时，按要求指定的表面温度进行定义。

在《钢质海船入级规范》（CCS 2018）及其修改通报第二篇第二章中规定了热应力计算所需考察的六种装载工况，分别为：（a1）均匀满舱工况、（a2）均匀半舱工况、（b1）中间舱满舱且前后两舱空舱工况、

（b2）中间舱半舱且前后两舱空舱工况、（b1）中间舱空舱且前后两舱满舱工况、（b2）中间舱空舱且前后两舱半舱工况。一般液货舱内，无论满舱还是半舱其内周界均考虑为液货的最大稳定温度。

完成上述的温度边界条件施加后，即可求解计算各计算工况下的温度分布情况，并根据温度分布情况建立温度场函数。

第三步结构分析。将分析由 Thermal 模式再切换为 Structural 模式，再一次修改单元属性。值得注意的是结构分析过程中隔热层不参与强度分析，需要在结构分析中将其剥离。创建温度载荷，并根据 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 5 章附录 1 的要求施加海水静水压力和海水动压力、货物压力以及端面弯矩（若仅温度载荷作用引起的热应力中的纵向拉、压应力小于 $42/\text{K}$ ， N/mm^2 （K 为材料系数））。经船级社同意，在计算模型两端可不施加船体梁总纵弯矩。

接下来的步骤就是常规的油船舱段分析，只是附加温度载荷罢了。

根据笔者以往的计算经验，对于需要装载高温液货的整体液货舱型船舶，应尽量保证其液货舱内部的平整，尽量将骨架翻至液货舱以外。这样做不仅方便了保温内胆的施工，同时对于控制温度应力也有不小的贡献。尤其是主甲板结构，如果主甲板结构做在舱内，极大地增加了舱内的热接触面积，不但会对液舱的保温效果大打折扣，同时还会增加保温层的建造难度。如果内胆结构与船体结构之间出现空腔，会使内胆损毁的概率极大增加。

参考文献：

[1] 中国船级社. 钢质海船入级规范 2018[S]. 北京：人民交通出版社，2018.

[2] 中国船级社. 散装运输液化气体船舶构造与设备规范 2018[S]. 北京：人民交通出版社，2018.

[3] 中国船级社. 散装运输危险液体化学品船舶构造与设备规范 2016[S]. 北京：人民交通出版社，2016.