

# 52 m 散装水泥船罐体支撑结构 局部强度分析与模糊评判

梁友庆

(南通市地方海事局 船舶检验科, 江苏 南通 226000)

**摘 要:**以 52 m 散装水泥船为研究对象,利用有限元分析软件,分析该船罐体支撑结构局部强度,在局部强度不满足规范要求的情况下,对局部结构提出三种改进方案:改变支撑结构横向板的厚度、增加支撑板结构的垂直扶强材和改变支撑结构板材属性。在通过计算验证应力计算值均满足规范要求的基础上,借助模糊综合评判理论对改进后三种方案进行比较分析,通过确定评价对象的因素集、确定评价因素的权重向量、确定评价对象的评语集、指标量化处理、二级模糊评判和一级模糊评判等流程,确立方案 为最优加强方案。

**关键词:**散装水泥船;罐体;支撑结构;强度分析;模糊评判

中图分类号:U674.13

文献标志码:A

文章编号:1671-9891(2019)02-0051-05

## 0 引言

目前,大部分水泥主要通过公路运输,采用纸袋包装。同时,纸袋类包装成本高,在运输过程中装卸效率也比较低。但如果在运输过程中使用水泥罐作为装载容器,不仅可以节省包装费用,而且具有装卸方便、损失小等优点。另外,水泥在密封罐中运输不易受潮,可以保证散装水泥的质量,还可以使周围环境减少遭受水泥粉尘污染的影响。因此,无论是陆路运输还是水路运输,水泥罐罐体支撑结构和罐体材料的研究显得非常关键<sup>[1]</sup>。

本文以 52 m 散装水泥船为研究对象,按照中国船级社《国内航行海船建造规范(2018)》的要求,首先利用有限元分析软件对水泥船罐体下方的支撑结构局部强度进行直接计算,以验证该区域的结构强度是否满足规范要求<sup>[2]</sup>,然后对不满足规范要求的局部结构提出三种改进方案,并借助模糊综合评判理论对改进后三种方案进行比较分析,最后确立方案 为最优加强方案。

## 1 52 m 散装水泥船介绍

52 m 散装水泥船为钢质船体,单底、单甲板、单机单桨型货船,中部货舱设置两个水泥货罐,主要用于装载散装水泥,航区为沿海航区。该船的主要参数为:总长 52.00 m,量吨甲板长 51.35 m,设计水线长 50.10 m,垂线间长 48.60 m,型宽 8.80 m,型深 3.80 m,设计吃水 2.90 m。FR55 至 FR87 为第一货舱,舱内设  $\Phi 5.3 \text{ m} \times 15 \text{ m}$  水泥罐一只(389 t);FR20 至 FR55 为第二货舱,舱内设  $\Phi 5.5 \text{ m} \times 18.6 \text{ m}$  水泥罐一只(291 t)。

## 2 罐体支撑结构局部强度校核

鉴于第二货舱罐体的重量比第一货舱罐体重量大,局部有限元模型构建如图 1 所示,长度方向从 FR20 至 FR55,横向和垂向方向分别为整个船宽和船深<sup>[3]</sup>,模型前后左右边缘上所有节点 6 个自由度进行约束<sup>[4]</sup>。载荷施加主要包括罐体的重量、舷外水压力以及船体自重,如图 2 所示。模型范围内部的罐体重量为 389 t,通过多点约束(MPC)对罐体与船体连接部位施加连接。舷外水压力考虑满载工况吃水为 2.9 m 来计算,结果如表 1 所示。

收稿日期:2019-02-02

作者简介:梁友庆(1976—),男,河北唐山人,南通市地方海事局船舶检验科中级检验员。

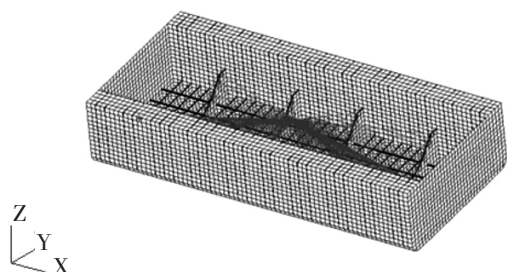


图 1 局部有限元模型

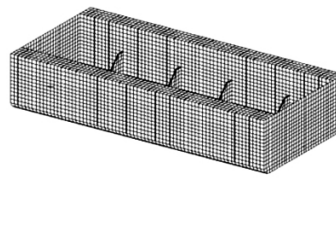


图 2 罐体载荷施加

表 1 应力汇总

构件名称	许用应力/(N·mm <sup>-2</sup> )	最大计算应力/(N·mm <sup>-2</sup> )	是否满足规范
船底板	$[\sigma_c] = 235$	57.7	满足
船底肋板	$[\sigma_c] = 235$	100.0	满足
船底纵桁	$[\sigma_c] = 235$	78.4	满足
梁单元	$[\sigma_c] = 235$	278.0	不满足
	$[\tau] = 141$	144.0	不满足
支撑构件	$[\sigma_c] = 235$	278.0	不满足

从表 1 可以看出,52 m 散装水泥船罐体下方支撑结构局部强度并不满足《国内航行海船建造规范(2018)》局部强度应力衡准的要求。这主要跟支撑结构上方罐体自身重量有直接关系,为了满足局部强度要求,可以对罐体支撑结构进行加强。

### 3 结构加强

结合水泥船罐体下方结构的特点,充分考虑船体自身强度的要求,罐体区域的加强方案主要包括以下 3 种:方案 ,改变支撑结构横向板的厚度——厚度由 6 mm 变为 10 mm,范围在 FR26、FR34、FR41 和 FR49;方案 ,增加支撑板结构的垂直扶强材——扶强材尺寸为 L90 × 56 × 6;方案 ,改变支撑结构板材属性——由低碳钢变为 Q345 高强度钢<sup>[5]</sup>,如表 2 所示。

表 2 支撑结构的加强方案

方案	方案	方案	方案
对象	横向板的厚度	垂直扶强材	板材属性
具体内容	厚度由 6 mm 变为 10 mm,范围在 FR26、FR34、FR41 和 FR49	扶强材尺寸为 L90 × 56 × 6	由低碳钢变为 Q345 高强度钢

通过对 52 m 散装水泥船支撑结构进行适当调整,得出罐体区域结构的应力值,结果如表 3 所示。

表 3 3 种不同方案下的应力汇总

不同方案下的应力(N·mm <sup>-2</sup> )					
构件名称	许用应力/(N·mm <sup>-2</sup> )	方案	方案	方案	是否满足规范
船底板	$[\sigma_c] = 235$	32.3	50.9	57.7	满足
船底肋板	$[\sigma_c] = 235$	52.9	88.2	100.0	满足
船底纵桁	$[\sigma_c] = 235$	46.4	69.4	78.4	满足
支撑构件 <sup>1</sup>	$[\sigma_c] = 235$	174.0	191.0	278.0	满足
	$[\sigma_c] = 345$				

注 1  $[\sigma_c] = 235 \text{ N/mm}^2$  为 Q235 钢的许用应力  $[\sigma_c] = 345 \text{ N/mm}^2$  为 Q345 钢的许用应力。

通过计算可以看出 3 种改进方案下船底板、船底肋板、船底纵桁以及支撑结构板材均小于对应的许用

值,改进后的 52 m 散装水泥船支撑结构局部强度满足规范要求。可见,加强支撑部位的结构可以有效降低罐体支撑结构的应力,提高整体的强度。然而,哪种方案对结构加强最有效却很难确定,这不仅跟强度有关,而且与工艺、经济成本、环境和人为操作等都有关系,需要进一步借助其他评判方法。

#### 4 模糊评判

本文前节已经提到对 52 m 散装水泥船罐体支撑结构的三种加强方案,每种方案中涉及结构强度、建造和成本控制等因素都不同,不能简单进行比较,可以通过多因素综合评判的指标——模糊综合评判来分析。该评判过程主要包括:建立相应的因素集、因素权重、备择集、量化指标和评判结果。

(1)建立因素集。针对本案例,为了确定哪种方案对罐体支撑结构最优,可以将三种加强方案考虑为第一级评价因素。建立的因素集包括船体局部强度、舱段建造水平和成本控制,分别用  $U_1, U_2, U_3$  来表示。第一级模糊集合可以用  $U$  表示,  $U = \{U_1, U_2, U_3\}$ 。

由于舱段建造水平包括焊接要求、切割工艺、装配难易以及涂装要领等,所以将建造水平中诸多因素归为二级评判因素。确定  $U_2$ (舱段建造水平)由焊接要求、切割工艺、装配难易以及涂装要领等四个子因素构成,分别用  $U_{21}$  表示焊接要求,  $U_{22}$  表示切割工艺,  $U_{23}$  表示装配难易程度,  $U_{24}$  表示涂装要领。第二级模糊集合可以用  $U_2$  表示,  $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}\}$ 。

(2)建立因素权重集。本部分主要对  $U = \{U_1, U_2, U_3\}$  和  $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}\}$  建立因素权重集。采用的方法是自上而下成对比较,比如  $U = \{U_1, U_2, U_3\}$  中  $U_1$ (船体局部强度)为主要因素,  $U_2$ (舱段建造水平)次之,最后为  $U_3$ (成本控制)。通过两两比较,最终确定  $U$  具体权重集。 $\{U_1, U_2\} = \{1, 0.9\}$ ,  $\{U_2, U_3\} = \{1, 0.8\}$ , 进而得到  $U$  的因素权重集  $A = (0.38, 0.34, 0.28)$ , 如表 4 所示。同理  $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}\}$  中  $U_{21}$ (焊接要求)为主要因素,之后依次是  $U_{22}$ (切割工艺),  $U_{23}$ (装配难易程度)和  $U_{24}$ (涂装要领),也进行两两比较,最终确定  $U_2$  具体权重集。 $\{U_{21}, U_{22}\} = \{1, 0.9\}$ ,  $\{U_{22}, U_{23}\} = \{1, 0.8\}$ ,  $\{U_{23}, U_{24}\} = \{1, 0.7\}$ , 进而得到  $U_2$  的因素权重集  $A_2 = (0.32, 0.29, 0.23, 0.16)$ , 如表 5 所示。

表 4  $U$  的因素权重集

因素	成对比较(自上而下比较)			权重
船体局部强度	1.00	—	1.00	0.38
舱段建造水平	0.90	1.00	0.90	0.34
成本控制	—	0.80	0.72	0.28

表 5  $U_2$  的因素权重集

因素	成对比较(自上而下比较)			权重
焊接要求	1.00	—	1.00	0.32
切割工艺	0.90	1.00	0.90	0.29
装配难易	—	0.80	1.00	0.23
涂装要领	—	—	0.70	0.16

(3)建立备择集。建立备择集主要从以下三个方案中选取最优方案。备择集用  $V$  来表示。 $V_1$  代表方案 ;  $V_2$  代表方案 ;  $V_3$  代表方案 。用集合表示为  $V = \{V_1, V_2, V_3\}$ 。

(4)量化指标。结合以上提到的各个因素,可以定出焊接要求、装配难易、涂装要领和切割工艺的因素集。从焊接角度出发,方案 的要求最高,其次是方案 ,最后是方案 。从装配难易出发,方案 和方案 要求最高,其次是方案 。从涂装要求出发,方案 的要求最高,其次是方案 ,最后是方案 。从切割工艺出发,方案 和方案 要求最高,其次是方案 。具体量化指标如表 6 所示。

表 6 3 种方案指标量化

量化指标	方案	方案	方案
焊接要求	0.90	0.75	1.00
装配难易	1.00	0.80	1.00
涂装要领	0.85	0.70	1.00
切割工艺	1.00	0.70	1.00

确定  $U_2$  内部的各个因素的指标顺利完成,而船体局部强度和成本控制往往需要通过计算值与参考值进行比较来确定,其中船体局部强度需要通过计算得到最大相当应力来衡量。满意度系数为计算值与参考值的比值,成本控制按照重量来衡量(以罐体下方支撑结构重量计算,以  $t$  为单位)。满意度系数为参考值比上量化值,其中参考值为原来材料重量,量化值为结构加强后的重量,见表 7 所示。

表 7 船体局部强度和成本控制的量化指标

评估指标		量化指标		
		计算值	参考值	满意度系数
结构强度/MPa	方案	174.00	235.00	0.26
	方案	191.00	235.00	0.19
	方案	278.00	345.00	0.19
成本控制/ $t$	方案	3.75		0.60
	方案	2.95	2.25	0.76
	方案	2.30		0.98

(5)  $U_2$  模糊评判。汇总表 6 的结果得到  $U_2$ (焊接要求、切割工艺、装配难易以及涂装要领)四个因素最终权重指标。用  $R_{21}$  表示焊接要求的评判集  $R_{21} = (0.9, 0.75, 1)$ ;用  $R_{22}$  表示切割工艺的评判集  $R_{22} = (1, 0.8, 1)$ ;用  $R_{23}$  表示装配难易的评判集  $R_{23} = (0.85, 0.7, 1)$ ;用  $R_{24}$  表示涂装要领的评判集  $R_{24} = (1, 0.7, 1)$ 。于是  $U_2$  最终的评判矩阵为:

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.75 & 1 \\ 1 & 0.8 & 1 \\ 0.85 & 0.7 & 1 \\ 1 & 0.7 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

采用矩阵相乘进行运算,于是得  $U_2$  结构建造模糊评判集为:

$$B_2 = A_2 \times R_2 = (0.32 \quad 0.29 \quad 0.23 \quad 0.16) \begin{bmatrix} 0.9 & 0.75 & 1 \\ 1 & 0.8 & 1 \\ 0.85 & 0.7 & 1 \\ 1 & 0.7 & 1 \end{bmatrix} = (0.93 \quad 0.75 \quad 1) \quad (2)$$

(6)  $U$  模糊评判。通过以上相同方法,可得到  $U$  模糊评判。三个因素的评判集  $R_1 = (0.26, 0.19, 0.19)$ ,  $R_2 = (0.93, 0.75, 1)$ ,  $R_3 = (0.60, 0.76, 0.98)$ , 评判矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.26 & 0.19 & 0.19 \\ 0.93 & 0.75 & 1 \\ 0.60 & 0.76 & 0.98 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B = A \times R = (0.38 \quad 0.34 \quad 0.28) \begin{bmatrix} 0.26 & 0.19 & 0.19 \\ 0.93 & 0.75 & 1 \\ 0.60 & 0.76 & 0.98 \end{bmatrix} = (0.58 \quad 0.54 \quad 0.68) \quad (4)$$

通过对 52 m 散装水泥船罐体支撑结构的三种加强方案进行模糊综合评判,确定评语集的数值,结合建造、结构强度和成本控制三个因素,得出结论认为,方案 改变支撑结构板材属性较为理想。

## 5 结束语

本文以 52 m 散装水泥船为研究对象,围绕该船货舱区域罐体支撑结构的局部强度进行系统分析,认为该船局部强度不满足规范,并对局部结构提出三种改进方案,包括改变支撑结构横向板的厚度、增加支撑板结构的垂直扶强材和改变支撑结构板材属性,改进后的计算值均满足规范要求。在此基础上,借助模糊综合评判理论,对船体改进后三种方案通过确定评价对象的因素集、确定评价因素的权重向量、确定评价对象的评语集、指标量化处理、二级模糊评判和一级模糊评判等过程,认为方案 Ⅲ 为最优方案,对改进散装水泥船罐体支撑结构局部强度具有一定参考价值。

## 参考文献:

- [1]吴金德,李海森,梁丰.散装水泥罐船罐体强度计算分析[J].四川水泥,2014(10):120-121.
- [2]蒋堃.基于有限元软件平台的桥梁构件自动计算[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [3]张净宙,王娜.散装水泥船水泥滑移附加倾侧力臂分析[J].船舶标准化工程师,2014(6):51-53.
- [4]钱敏红.罐体水泥船罐体支撑结构及船体局部强度分析[J].中国水运,2015(15):7-8.
- [5]张新放,关克平.基于模糊综合评价的客船应急疏散模型研究[J].中国修船,2016(3):21-24.

(责任编辑 顾力豪)

# Local Strength Analysis and Fuzzy Evaluation of Supporting Structure of 52 m Bulk Cement Ship's Tank

LIANG You-qing

(Dept. of Ship's Survey, Nantong Local Maritime Safety Administration, Nantong 226000, China)

**Abstract:** Taking the 52 m bulk cement ship as a research focus, the finite element analysis software is used to analyze the local strength of a ship's tank supporting structure. Under the condition that the local strength does not meet the specification requirements, three improvement schemes are proposed: changing the thickness of supporting structural transvers plate, increasing vertical stiffeners for supporting structure and changing the properties of the structure plate. On the basis of calculating and verifying that the calculated values of the stresses all meet the requirements of the specification, the fuzzy comprehensive evaluation theory is used for comparing and analyzing the three improved schemes. By determining the factor set of the evaluation objects, the weight vector of the evaluation factors, and the evaluation objects' comment set as well as quantitative indicator processing, secondary fuzzy evaluation and first-level fuzzy evaluation etc., the scheme III is determined to be the optimal reinforcement one.

**Key words:** bulk cement ship; tank; supporting structure; strength analysis; fuzzy evaluation