

废气脱硫装置在大开口船舶上的应用

陈炜, 葛沛, 郑金伟, 许新启, 刘灿波
南通中远川崎船舶工程有限公司 江苏 南通 226005

摘要 随着低硫燃油标准的实施, 2020 年 1 月 1 日及以后船上使用的任何燃油硫含量不应超过 0.5%。由于安装脱硫塔的成本相比采用液化天然气燃料要低, 而直接使用低硫燃油价格高, 众多船东新造船时选择安装废气脱硫装置。本文以公司建造的 6 万吨级大开口散货船为研究对象, 讨论了废气脱硫装置对船舶设计带来的影响, 指出了设计要点。

关键词 低硫油; 脱硫塔; 废气脱硫装置; 大开口船舶
中图分类号: U662.1 **文献标志码:** A

¹随着国际海事组织通过了全球航行船舶使用 0.5% 的低硫油标准, 2020 年 1 月 1 日及以后, 船上使用的任何燃油硫含量不应超过 0.5%。为使船舶硫排放满足规范要求, 目前有三种解决方案: (1) 采用 0.5% 或以下低硫含量的燃油; (2) 采用替代燃料如液化天然气 (LNG); (3) 使用经批准的船舶废气脱硫技术。上述三种应对硫氧化物排放的方案各有优缺点。如选择使用含硫量 0.5% 以下低硫油, 合规的硫含量 0.5% 的低硫调和燃油价格难以预测。供应保障可能是不确定因素。如选用 LNG 等清洁能源作为替代燃料, 硫氧化物和颗粒物排放虽可以忽略不计, 但安装 LNG 燃料舱, 配置相关的燃气供气系统、双燃料发动机等设备, 初期投资成本很大, 且世界范围内港口加气设施还很不完善。

国际海事组织允许采用替代方法将硫氧化物排放量降到等效水平, 通过废气净化技术开发出了减少 SO_x 排放的低成本替代方法, 即采用废气后处理脱硫装置。采用废气脱硫装置的优点是可以继续使用普通重质燃油, 大大节省燃油费用支出。按目前市场上最简单的开式废气脱硫装置 130~200 万美元的价格, 硫含量 0.1% 的船用调和燃油和普通重油差价按 180 美元/吨估算, 投资成本 2~3 年之间能够回收。因此, 越来越多的船东倾向于安装废气脱硫装置, 以应对硫氧化物的排放限制。本文以公司设计建造的 6 万吨级大开口散货船为研究对象, 研讨了安装废气脱硫装置的设计方案。

1 废气脱硫装置的类型

废气脱硫技术, 分为干式和湿式方法除去 SO_x 。干法脱硫的原理是使用氢氧化钙等碱性固体颗粒作为吸附剂, 直接与废气中的硫氧化物反应生成硫酸盐进行脱硫。湿法脱硫的原理是采用海水或 NaOH (或 $\text{Mg}(\text{OH})_2$) 溶液在烟气经过洗涤塔时对废气进行洗涤。目前得到

广泛应用的是湿式脱硫技术。从使用效果来看, 湿法脱硫在脱硫效果、经济性和操作性等方面具有明显优势。

根据洗涤水的来源和循环方式, 湿式废气脱硫装置简单分为三种: 开式海水脱硫装置、闭式淡水脱硫装置和混合脱硫装置。开式海水脱硫装置是采用海水脱硫法, 洗涤废气后的废水满足 MEPC258(69) 排放要求后才可以排入大海。

开式海水脱硫装置由于系统组成相对简单, 初期投入成本较低, 目前应用较广。但目前一些国家担忧开式系统洗涤水直接排放入大海会对大海造成污染而开始禁止采用开式系统, 如比利时海域(距岸 3 海里)、德国内河和部分港口、新加坡港口海域、香港港口、中国内河控制区、沿海控制区的港口水域和渤海海域。航行在这些海域的船舶需要考虑使用闭式系统或混合系统。

闭式脱硫系统, 采用碱液脱硫法, 洗涤后的碱性溶液回到循环水柜。为了除去碱性溶液中的颗粒物等杂质, 设置了分离设备(离心机或膜式过滤器)对循环碱液进行分离, 分离后的干净液体排出舷外或设置零排放水舱临时存放, 或进入循环水柜, 分离后的残留物不得排入大海, 也不允许在船上焚烧, 需要设置专门的渣柜进行收集。

混合废气脱硫系统, 是将开式系统和闭式系统及其各自的工作模式结合在一起。由于采用组合方式, 因此混合系统更加复杂, 但是具有最大灵活性, 根据船舶所在海域的碱度或排放法规要求不同, 而选择运行开式系统或闭式系统。通常在外海中使用开式系统, 因为碱度足够高, 洗涤效果好。闭式系统用在某些封闭海域、港口和河口或者海水碱度较低的环境中。6 万吨级大开口散货船项目, 安装的是目前船舶领域普遍应用的开式海水脱硫装置。

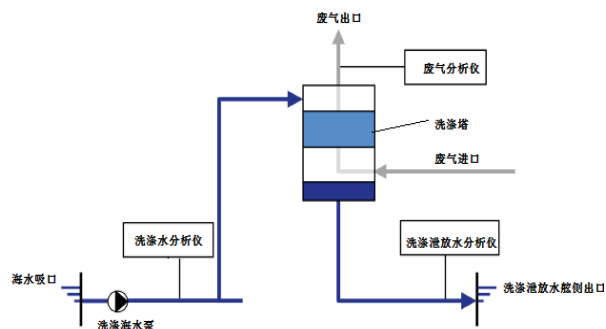


图1 开式废气脱硫系统图

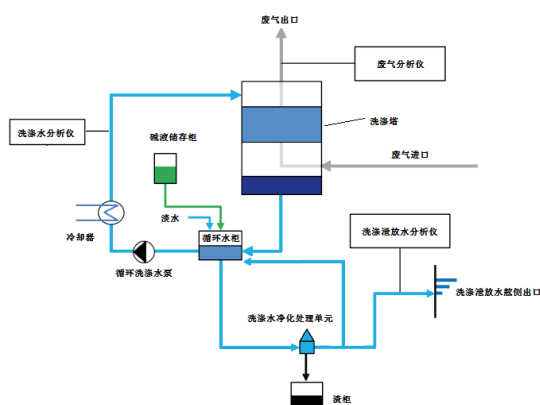


图2 闭式废气脱硫系统图

如图3，废气脱硫洗涤塔主要有两种结构形式，一种是U型洗涤塔，即废气先进入废气预洗涤管，海水预洗涤后再进入洗涤塔本体洗涤；另一种是直列式洗涤塔，即高温废气直接从洗涤塔本体底部进入被洗涤水洗涤，两种洗涤塔结构各有优缺点，直列式洗涤塔相比U型洗涤塔，可以干运转，结构更紧凑，更易于船上布置。U型洗涤塔，不可以干运转，需要设置废气旁通管。U型洗涤塔分为两段式结构（图3），废气首先进入第一段废气预洗涤管预洗涤，废气预洗涤管能提高颗粒物的截获效果，颗粒物被大部分去除，废气流速明显降低从废气预洗涤管进入第二部分洗涤塔本体，洗涤塔本体是一种填充床洗涤塔，填充床为交叉网状结构，由许多金属片堆叠而成，能够极大的增加洗涤水与废气的接触面积，能使硫氧化物降到所需水平，从而使得废气在洗涤塔本体的洗涤效果更好，另外所有喷入的海水会汇聚在U型弯底部，并从底部排放口排出，可以完全避免洗涤水倒灌进柴油机的风险。而对于直列式洗涤塔结构，因废气管从洗涤塔底部接入，管路布置设计需考虑防止洗涤水倒灌至废气管的相关的对策。

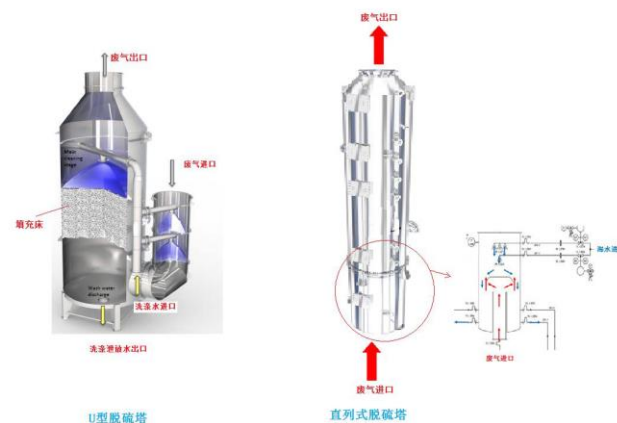


图3 废气脱硫洗涤塔的两种结构形式

考虑到耐干烧的需要，直列式废气脱硫洗涤塔体一般采用超级奥氏体不锈钢材质。而U型废气脱硫洗涤塔体，根据塔体不同部分的工作介质的理化特性，一般由三种材质组成。预洗涤管部分既要耐受400度高温废气，又要受到喷淋海水的腐蚀，因此采用超级奥氏体不锈钢材质。洗涤塔本体下部长期与最低pH值2.5的洗涤泄放水接触，需耐酸腐蚀，采用超级双相不锈钢材质。洗涤塔本体上部长期与喷淋的海水接触，需耐海水腐蚀，采用双相不锈钢材质。

2 6万吨级大开口散货船简介

某6万吨级大开散货船是我司自主开发的多用途船舶，采用舷侧双壳结构、大开口的设计，开口的宽度达到舷侧极限，可以装载包装木材、纸浆包、钢卷、铝锭等多种散货/包装货物。由于该散货船的运输航线较广泛，因此船东希望安装废气脱硫洗涤塔，以应对国际海事组织对硫化物排放的限制。其主尺度及设计参数如下：

主尺度：199.90(长)×32.24(宽)×18.60(深)m

设计吃水：11.3 m

结构吃水：13.0 m

3 废气脱硫装置对船舶性能设计的影响

3.1 总体布置

船舶加装废气脱硫装置后，烟囱需要扩大以布置其本体、管路和相关设备。烟囱扩大将对船舶舾装数产生影响并进而对锚泊、系泊设备的选型有影响。以某6万吨级大开口散货轮为例，对加装废气脱硫装置后的布置进行研讨。由于设备空间的增加，烟囱的布置需要改变，机舱顶棚和烟囱尾壁纵向长度增加，在罗经甲板处作变宽度

设计, 罗经甲板以上部分宽度为 8 米, 以下部分宽度 9 米。罗经甲板以上的宽度小于 $B/4$ (B 为船宽), 以便其高度不会计入艙装数中, 使烟囱扩容导致的艙装数上升幅度降至最低, 避免增加锚泊系泊设备的规格。为了方便安装废气脱硫装置, 在船舶尺寸允许的情况下, 也可以考虑单独增加一个废气脱硫塔烟囱, 两个烟囱前后放置或者并排放置但不相连, 这样两个烟囱的宽度都小于 $B/4$, 可以不用计入艙装数计算。本船由于空间尺寸限制, 采用了第一种布置方案。

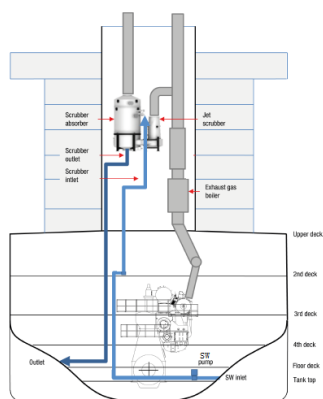


图4 开式废气脱硫系统机舱布置横剖面示意图

3.2 总纵强度校核

安装废气脱硫装置是一个系统工程,除了空间布置上扩大外,由于安装了废气脱硫装置和相关配套设备,其也会导致船舶的空船重量增加,重心后移。并且由于这些重量是增加在船舶艏部,对于中拱情况下的配载,剪力弯矩会受到不利影响。选取剪力最严厉的工况(如隔舱装载工况)进行强度校核。计算结果表明,安装废气脱硫装置后,载况的剪力弯矩值仍在许用值范围内;剪力部分的变化范围为 $-0.3\% \sim 0.2\%$,弯矩部分变化范围为 $-3.1\% \sim 0.2\%$,每项都呈现出相似规律。

3.3 雷达盲区影响及雷达桅布置优化

废气脱硫装置安装后，烟囱需要更大的空间来布置相关本体、管路和设备。

加宽加高后的烟囱可能导致部分环照灯盲区增大，同时对雷达的盲区也会产生较大影响，需提高雷达桅的高度来解决。

安装废气洗涤塔后, 烟囱抬高 2.5 米, 为保证雷达桅上的雷达能有效正常工作, 雷达高度需在原先高度的基础上抬高 2 米。如将雷达直接抬高 2 米, 其周围的 C 站高度将不满足规范要求。故保持雷达与 C 站的相对位置关系, 将雷达桅桅杆下部结构加高了 2 米。

4 结构布置优化及振动评估分析

由于安装脱硫塔之后烟囱及居住区发生较大变更, 烟囱以及居住区结构重量也有所增加, 从 278 吨增加至 312 吨, 结构重量增加 34t, 将对其固有频率造成比较大的影响。另外由于结构变化对烟囱以及居住区刚度造成一定影响, 从而对固有频率也会造成影响。综合多种因素影响, 对其固有频率影响较大, 因此使用有限元方法计算了烟囱和居住区固有频率。由表 1 结果可知, 安装脱硫塔之后, 居住区和烟囱纵向和横向固有频率均发生变化, 但是仍与主机和螺旋桨激励频率避开, 不会发生共振。

表 1 居住区和烟囱安装脱硫塔前后的振动对比

固有频率	居住区		烟囱	
	安装 脱硫塔前	安装 脱硫塔后	安装 脱硫塔前	安装 脱硫塔后
压 载 吃 水 (纵向)	770	671/985	770	671/985
压 载 吃 水 (横向)	1037	1051	818/1037	952/1051

安装脱硫塔之后的居住区和烟囱在螺旋桨和主机激励下的横向响应值均较小；在螺旋桨1次、2次激励下的纵向响应值也均较小；而在主机激励下的纵向响应值与未安装脱硫塔相比，增大较多，考虑采取补强措施。补强方案如图5所示，在烟囱和驾驶甲板之间增加肘板。从搭载脱硫塔的实船测量数据可以看出，海试实测数据比推测值要低，该补强方案可以显著降低居住区和烟囱在主机激励下的纵向响应。

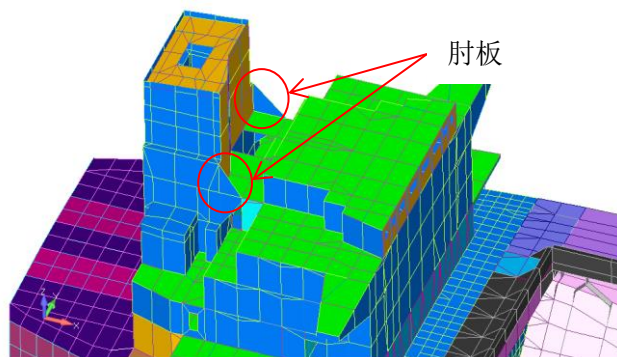


图 5 烟囱结构振动模型及补强示意

5 废气脱硫装置海上测试

根据船级规范要求,需进行脱硫系统运行操作试验,重点是针对废气分析仪及洗涤水监测单

元功能进行验证。因规范对试验用燃油硫含量没有明确要求, 经与船级社确认, 规范并不要求验证脱硫塔的脱硫效果, 该试验船级规范需确认废气及洗涤水监测单元功能及相关排放指标是否满足规范要求, 如数据采样及记录时间、GPS 信号、废气的 SO_2/CO_2 比值、洗涤水的 PH、PAH、浊度、硝酸盐等指标。厂家通常采用尽可能较高含硫量燃油 (2.5%~3.5% 硫含量) 进行试验, 如采用过低含硫量燃油进行试验, 可能会使得试验结果废气及洗涤水排放指标会远远偏离目标值, 难以验证废气及洗涤水检测单元的功能是否正常。本船经过实船测试, 废气脱硫装置最大设计负荷下的排放测试结果满足 MARPOL 要求。

6 结论

本文简述了废气脱硫装置的类型, 以公司设计建造的 6 万吨级大开口散货船为例, 讨论了废气脱硫装置对船舶布置设计的影响, 评估了居住区和烟囱结构在安装脱硫塔之后的振动响应, 得出以下结论。

- (1) 烟囱布置需要扩展, 以配合脱硫塔的布置, 但考虑到舳装数的影响, 烟囱应尽量采用变宽度设计, 防止舳装数上升而导致锚泊和系

泊设备的规格升档。

- (2) 安装脱硫塔虽然增加了船舶的空船重量, 重心向船尾移动, 但是对弯矩剪力影响不大。
- (3) 烟囱加高后, 为保证雷达桅上的雷达能正常工作, 雷达桅桅杆的高度需要整体抬高。
- (4) 安装脱硫塔后, 居住区和烟囱纵向和横向固有频率均发生变化, 但是仍与主机和螺旋桨激励频率避开, 不会发生共振。为了降低主机激励下的纵向响应值, 可以在烟囱和驾驶甲板之间增加肘板。
- (5) 在海上对脱硫塔的脱硫效果进行实船验证, 排放测试结果满足规范要求, 因此脱硫塔在大开口船舶上获得成功应用, 也为其他船型安装废气脱硫装置积累了宝贵的设计经验。

参考文献:

- [1] 张华平, 马勇. 烟气除硫装置系统在船舶上的应用[J]. 船舶设计通讯, 2016 (4), 145.
- [2] 中国船级社. 船舶废气清洗系统预设指[Z]. 2016-09-27.
- [3] 谭云松, 张雪滨. 几种脱硫技术特点简介[J]. 锅炉技术, 2005, (1): 31-32.



江苏船舶微信公众号, 欢迎关注, 欢迎投稿!