

船舶烟气海水脱硫吸收塔工艺研究与设计

冯森森, 张尚文, 文晓龙, 王海鹏, 张兵

(上海蓝滨石化设备有限责任公司, 上海 201518)

摘要: 针对船舶烟气中 SO_2 的处理工艺, 根据烟气流量、烟气中 SO_2 含量, 从塔径、填料层类型和高度、液体喷嘴数量、除雾装置 4 个方面进行了相关参数设计和计算, 最终给出了在现有烟气流量和含硫量条件下的船舶用海水脱硫吸收塔的具体参数。同时考虑烟气中含硫量的变化, 并保证能够完全脱除烟气中的 SO_2 , 设置四排液体喷嘴, 通过有限元分析软件 FLUENT, 根据出口处含硫量、塔内压力分布和流速分布优化了不同含硫量条件下喷嘴的启停方式。

关键词: 吸收塔; 海水脱硫; 船舶; 工艺研究

中图分类号: U664.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)10-0085-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.10.014

Technical Study and Design of Absorption Tower for Ship Flue Gas Desulphurization

FENG Sen-sen, ZHANG Shang-wen, WEN Xiao-long, WANG Hai-peng, ZHANG Bing

(Shanghai Lanbin Petrochemical Equipment Co., Ltd., Shanghai 201518, China)

ABSTRACT: Based on the treatment technology of SO_2 in ship flue gas, according to the flue gas flow rate and the concentration of SO_2 , this paper designed and calculated relevant parameters from four aspects, including the tower diameter, type and height of packing layer, number of liquid nozzles, and demister. Then this paper proposed specific parameters of seawater desulfurization absorption tower for ships under the condition of existing flue gas flow rate and sulfur content. At the same time, considering the variation of sulfur content in the flue gas, and ensuring that SO_2 in the flue gas can be completely removed, the author set four rows of liquid nozzles. Through the finite element analysis software FLUENT, the start and stop modes of the nozzles under different sulfur content conditions were optimized according to the sulfur content at the outlet, pressure distribution and flow velocity distribution in the tower.

KEY WORDS: absorption tower; seawater desulfurization; ship; technical study

从 2019 年 1 月 1 日起, 我国将对整个领海的硫含量限制在 0.5% 以内。特别是 2018 年 10 月 1 日起, 长三角领海 (距海岸 22.224 km) 对船舶实施 0.5% 的

硫排放上限要求^[1-3], 全球各大船舶公司都在寻求解决办法, 其中, 安装脱硫系统是最经济、最快捷的办法。在海水脱硫系统中, 吸收塔效率的高低决定该系

收稿日期: 2021-04-17; 修订日期: 2021-06-10

Received: 2021-04-17; Revised: 2021-06-10

基金项目: 甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司科学技术发展基金项目 (18LKJ016)

Fund: Science and Technology Development Fund Project of Gansu Lanke Petrochemical High-tech Equipment Co., Ltd. (18LKJ016)

作者简介: 冯森森 (1988—), 女, 工程师, 主要研究方向为海洋和陆地油气田地面工程工艺设计、压力容器设计。

Biography: FENG Sen-sen (1988—), Female, Engineer, Research focus: process design and pressure vessel design of offshore and onshore oil and gas field surface engineering.

引文格式: 冯森森, 张尚文, 文晓龙, 等. 船舶烟气海水脱硫吸收塔工艺研究与设计[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 085-091.

FENG Sen-sen, ZHANG Shang-wen, WEN Xiao-long, et al. Technical study and design of absorption tower for ship flue gas desulphurization [J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(10): 085-091.

统性能的优劣,所以填料塔的设计尤为重要。目前国内对于散堆填料都有相应计算公式和实验结果,而对规整填料,尤其是对 Mellapak 的填料层高度计算较少。在国内的相关填料手册中^[4-5],均是首先针对填料塔类型、高度等方面进行计算,而填料塔的传质过程多是针对设计好的填料塔进行后评价,对调料本身的设计过程无参考价值。因此文中考虑填料的传质过程,就常压塔 Mellapak 填料做了传质计算,对海水脱硫吸收塔做了合理设计,并同时考虑填料吸收和喷淋相结合的方式对喷淋塔的工艺进行了分析。

1 海水脱硫吸收塔的工艺设计

海水的 pH 值一般为 7.8~8.3,呈弱碱性,而海洋本身就是一个具有天然碱度的巨大酸碱平衡缓冲体。海水法烟气脱硫工艺就是利用海水这一特质脱除烟气中的 SO_2 ,海水吸收烟气中的 SO_2 ,海水的 pH 值下降,吸收 SO_2 后的海水在吸收塔塔底进行曝气和水质恢复,已恢复海水满足海水达标排放的要求,进行排放^[6-8]。

海水脱硫工艺主要由烟气处理、曝气及水质恢复过程组成。海水吸收烟气中的 SO_2 ,其化学反应为: $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HSO}_3^- + \text{H}_3\text{O}^+$, $\text{HSO}_3^- \rightarrow \text{SO}_3^{2-} + \text{H}_3\text{O}^+$ 。因海水具有酸碱缓冲能力,所以脱硫后的海水在吸收塔底部或曝气池中发生海水酸碱自调节反应,海水的 pH 值逐渐恢复。反应中产生的亚硫酸根离子,在吸收塔下部或曝气池中,被鼓入的空气氧化成稳定的硫

酸根离子^[9]。

从上述反应可以看出,海水脱硫是基于海水碱度和海水酸碱平衡缓冲能力,将烟气中的 SO_2 最终以硫酸盐的形式重新排向大海^[10-11]。因此设计船舶烟气海水脱硫吸收塔,对船舶海上烟气脱硫处理具有十分重要的意义。

目前二氧化硫处理塔主要分为喷淋吸收塔、填料吸收塔、喷射鼓泡反应器和双回路塔四大类。本文中综合考虑喷淋吸收塔和填料吸收塔两种类型,从塔径、填料层高度、喷嘴数量与布置方式、除雾装置 4 个方面进行了设计。

1.1 物料守恒计算

船舶烟气主要成分及摩尔分数见表 1,计算相关参数如下。

混合气体的平均摩尔质量:

$$M_g = \sum y_i M_i = 28.78 \text{ kg/mol} \quad (1)$$

混合气体的平均密度:

$$\rho_g = \frac{PM_g}{RT} = 1.2 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

式中: P 为标准大气压; R 为气体的平衡常数; T 为温度。

吸收塔物料衡算示意图见图 1。 V 和 L 分别为气液摩尔流量, x 和 y 分别为液体和气体的摩尔浓度, y_1 和 y_2 分别为气相进出口 SO_2 的摩尔浓度, x_2 和 x_1 分别为液相进出口 SO_2 的摩尔浓度, H 为填料层高度。

表 1 烟气成分以及摩尔分数

Tab.1 Flue gas composition and mole fraction

烟气成分	O_2	N_2	CO_2	H_2O	SO_x	CO	HC	PM
摩尔分数/%	8.68	72.96	8.56	9.73	0.068	6×10^{-5}	1.8×10^{-4}	1.2×10^{-4}

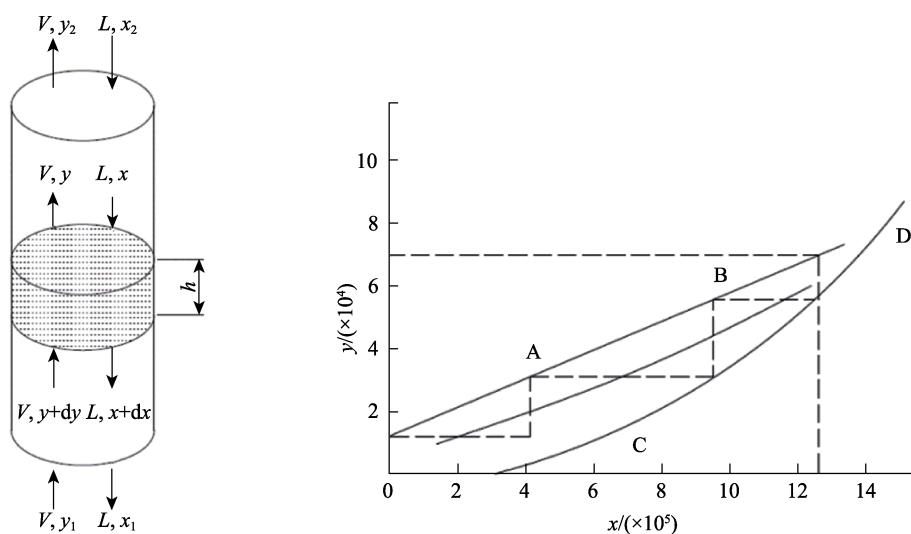


图 1 吸收塔物料衡算示意

Fig.1 Diagram of material balance in absorption tower

假设在初始时刻, 液相中无 SO_2 , 塔底气相入口处 SO_2 的摩尔分数为 $y_1=6.8 \times 10^{-4}$ 。当 SO_2 的吸收效率 $\eta=96\%$, 可得此时 $y_2=2.72 \times 10^{-5}$ 。

根据相平衡数据计算得相平衡曲线^[12-13], 与 $y_1=6.8 \times 10^{-4}$ 相平衡的液相二氧化硫的摩尔分率 $x_1=12.36 \times 10^{-5}$, 操作线为 $y=5.28x+2.72 \times 10^{-5}$ 。

在低浓度吸收过程中, 塔内气液浓度变化小, 可以认为气体和液体沿塔高的流量变换不大, 可用摩尔比来表示溶质浓度^[14-15]:

$$\frac{L}{G} = 1.2 \left(\frac{L}{G} \right)_{\min} = 1.2 \times \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = 6.34 \text{ L/m}^3 \quad (3)$$

式中: L 、 G 分别为液体、气体的质量流量, kg/h ;

船舶柴油机的烟气量为 $1.2 \times 10^5 \text{ kg/h}$, 可求得液相流量 $L=628\ 760.33 \text{ kg/h}$ 。因此通过在操作线与平衡线之间的阶梯图解得: $NT=2.6$ 。

1.2 塔径设计计算与校核

对于填料塔内气体的扩散可根据贝恩-霍根公式计算^[16]:

$$\lg \left[\frac{u_{\text{gf}}^2}{g} \frac{a}{\varepsilon^3} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \mu_l^{0.2} \right] = A - 1.75 \left(\frac{L}{G} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (4)$$

式中: u_{gf} 为泛点空塔气速, $u_{\text{gf}}=3.06 \text{ m/s}$; g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 ; a/ε^3 为干填料因子, 其中 $a=125 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $\varepsilon=98.5\%$; μ_l 为液相黏度, 文中海水 (30°C) 取 $\mu_l=0.8 \text{ mPa}\cdot\text{s}$; ρ_l 、 ρ_g 分别为液体、气体的密度, kg/m^3 ; A 为关联系数, 与填料塔形状和材料有关, 金属孔板波纹填料 $A=0.291$ 。

取空塔气速为泛点气速的 80% , 则 $u_0=2.45 \text{ m/s}$, 因此塔径为^[17]:

$$D_T = \sqrt{\frac{4V_S}{\pi u_0}} \quad (5)$$

式中: V_S 为船舶柴油机的烟气量。因此计算塔径 $D_T=3.76 \text{ m}$, 取整为 3.8 m 。

通过塔器实际泛点率和喷淋密度进行塔径校核。

1) 泛点率。计算实际空塔气速 $u=2.02 \text{ m/s}$, 因此校核实际泛点率为 66.01% , 满足塔器设计要求 ($50\%\sim 80\%$)。

2) 喷淋密度。对于光亮不锈钢等金属, 最小喷淋密度 $U_{\min}=3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。计算该塔的喷淋密度^[18]:

$$U = \frac{L}{0.785D^2} = 54.11 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h}) > U_{\min} \quad (6)$$

满足最小喷淋密度要求。

经以上校核可知, 该塔直径 $D_T=3.8 \text{ m}$ 合适。

1.3 填料层高度计算

选择合适的填料是填料塔设计的关键, 不仅需要符合工艺要求, 而且要节省系统投资和工程成本。从填料传质效率、填料层通量、填料层压降及操作

性能等综合考虑, 选择金属孔板波纹填料, 具有结构紧凑、压降小、处理能力大、传质效率高和比表面积大等优点^[19]。

针对海水脱硫吸收塔, 采用常压金属孔板波纹填料 (Mellapak) 塔, 其中金属孔板波纹填料为 125Y, 相关参数见表 2。根据 Rocha 提出的 SRP(II) 模型^[20-21], 计算金属规整填料的等板高度 (HETP)。

表 2 Mellapak 塔基本参数
Tab.2 Basic parameters of Mellapak tower

规格型号	比表面积/ m^{-1}	孔隙率/%	θ	S/m
125Y	125	98.5	45°	0.024

计算填料塔内气膜传质系数:

$$K_g = 0.054 \left(\frac{(U_{\text{ge}} + U_{\text{le}}) \rho_g S}{\mu_g} \right)^{0.8} \left(\frac{\mu_g}{D_g \rho_g} \right)^{0.33} \frac{D_g}{S} \quad (7)$$

式中: U_{ge} 为填料内有效的气相流速; U_{le} 为填料内有效的液相流速; D_g 为气相扩散系数, SO_2 在混合气体中的扩散系数 $D_g=1.87 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

计算有效加速度:

$$g_{\text{ef}} = g \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right) \left[1 - \frac{\frac{\Delta P}{\rho_l}}{\left(\frac{\Delta P}{\rho_l} \right)_f} \right] = 6.85 \text{ m/s}^2 \quad (8)$$

计算操作持液量:

$$h_l = \left(\frac{4F_l}{S} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3\mu_l U_{\text{ls}}}{\rho_l \varepsilon g_{\text{ef}} \sin \theta} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.144 \text{ m} \quad (9)$$

式中: U_{ls} 为空塔液相流速, $U_{\text{ls}}=0.015 \text{ m/s}$ 。

因此计算填料塔内有效的气相和液相流速:

$$U_{\text{ge}} = \frac{U_{\text{gs}}}{\varepsilon(1-h_l) \sin \theta} = 4.1 \text{ m/s} \quad (10)$$

$$U_{\text{le}} = \frac{U_{\text{ls}}}{\varepsilon h_l \sin \theta} = 0.15 \text{ m/s} \quad (11)$$

式中: U_{gs} 为空塔气相流速, $U_{\text{gs}}=4.1 \text{ m/s}$ 。

因此, 填料塔内气膜传质系数为:

$$K_g = 0.0426 \text{ m/s} \quad (12)$$

液膜传质系数为:

$$K_l = 2 \sqrt{\frac{D_l U_{\text{lo}}}{\pi S}} = 0.000\ 12 \text{ m/s} \quad (13)$$

填料塔有效比表面积可通过式 (14) 计算:

$$\frac{a_e}{a_p} = F_{\text{se}} \cdot F_{\text{r}} = F_{\text{se}} \cdot \frac{29.12(W_{\text{el}} F_{\text{rl}})^{0.15} S^{0.359}}{R_{\text{el}}^{0.2} \varepsilon^{0.6} (1-0.93 \cos \gamma) (\sin \theta)^{0.3}} \quad (14)$$

式中: F_{se} 为填料因表面沟槽、突起等导致的表面增强因子, 对于常压金属孔板波纹填料, $F_{\text{se}}=0.35$; γ 为固液间接触角度, 与液体的表面张力有关, 这里取值: $\cos \gamma=0.9$ ($\sigma<0.055 \text{ N/m}$), $\cos \gamma=5.211 \times 10^{-16.835\sigma}$

($\sigma > 0.055 \text{ N/m}$)。

因此填料塔有效比表面积 $a_e = 168 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

填料的总传质高度为：

$$H_{OG} = H_G + \lambda H_L = \frac{U_{Gs}}{K_G a_e} + \lambda \frac{U_{Ls}}{K_L a_e} \quad (15)$$

因此最终确定填料等板高度为：

$$\text{HTPE} = H_{OG} \frac{\ln \lambda}{\lambda - 1} = 1.01 \text{ m} \quad (16)$$

式中： λ 为平衡线斜率与操作斜率之比。

1.4 液体喷嘴数量计算

为了在填料表面形成液膜，提供气液传质表面，在填料塔填料层上部安装了喷淋装置。与管式和槽式喷淋装置相比，喷嘴式喷淋装置具有结构简单，液体分布性能好、能耗低、操作简单等优点。脱硫填料塔的喷淋装置选择喷嘴式的喷淋清洗烟气。

喷嘴数量计算：

$$n = \Psi D_0^2 / d^2 \quad (17)$$

式中： Ψ 为覆盖率，取 200% 或 220%； d 为喷嘴在喷射距离 1m 处的喷射直径，m。

计算喷嘴数量可得， $n=8.8$ ，通过圆整，填料塔内选用 9 个喷嘴。

1.5 除雾装置设计

气体离开填料塔，会携带一部分液沫，因此在气体出口处安装除雾装置。折形叶片除雾器因压降小，除雾效率高，用于脱硫塔烟气清洗后除雾，垂直流过折形叶片的最大风速：

$$u = k \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}} \quad (18)$$

式中： u 为通过折形叶片的最大风速，m/s； k 为速度常数，通常取 0.085~0.107。文中取 $k=0.107$ ，则通过折形叶片的最大风速 $u=3.06 \text{ m/s}$ ，计算所需除雾板组的横截面积为 9 m^2 。

根据上述计算，最终确定文中船舶烟气海水脱硫吸收塔的设计参数和工艺参数见表 3。

表 3 船舶烟气海水脱硫吸收塔的设计参数和工艺参数

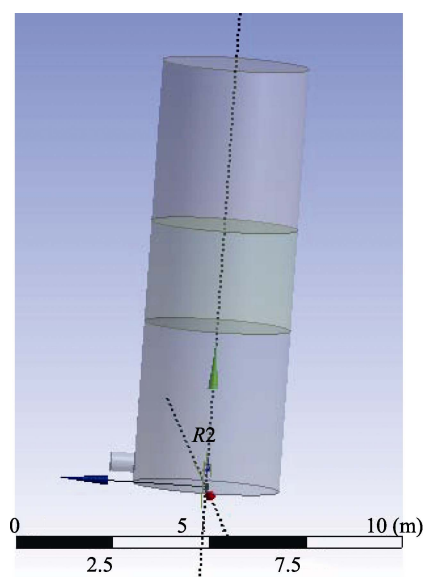
Tab.3 Design and technical parameters of ship flue gas desulfurization absorption tower

参数名称	参数值
气相质量流量	$1.2 \times 10^5 \text{ kg/h}$
液相质量流量	$6.28 \times 10^5 \text{ kg/h}$
泛点风速	3.2 m/s
空塔风速	2.6 m/s
塔径	3.8 m
最小喷淋密度	$3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
等板高度 HETP	1.01 m
填料层厚度	2.62 m
塔高	11 m

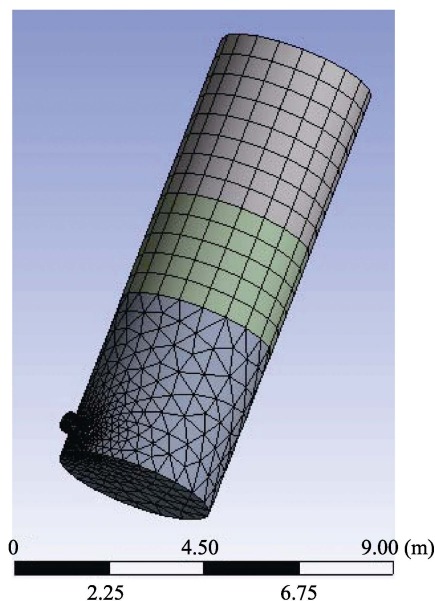
2 烟气流量对液体喷嘴布置的影响

2.1 物理模型和数学模型建立

计算域为竖直入口烟道至脱硫塔出口区域，按照填料塔的设计参数，建立全尺寸的三维模型。底部设计进气管路，塔中填料层用多孔介质代替，考虑其整流作用和压降，几何模型如图 2a 所示。采用 Ansys Fluent Meshing 网格工具，进行多面体网格划分，并对喷淋层及喷嘴区域进行局部网格加密，对不同网格数量（27 万、32 万和 45 万）进行网格独立性测试，最终确定网格数量为 32 万，如图 2b 所示。



a 几何模型



b 网格划分

图 2 填料塔模型及网格划分

Fig.2 Packed tower model and grid division: a) geometric model; b) meshing

模型选取和边界条件设置时,考虑以下几点:选用 standard $k-\varepsilon$ 模型模拟塔内的湍流流动;多相流模型选取欧拉模型;选用组分输运模型计算烟气中的输运和扩散;填料层采用各向异性多孔介质模型进行简化;烟气入口设置为质量入口条件,出口设置为压力出口条件;海水喷淋选用离散相模型进行模拟;由于流速较快,在求解过程中选用耦合进湍流求解模块。

2.2 喷嘴开启方式分析

船舶柴油机的烟气量为 1.2×10^5 kg/h,入口烟气温度为 $120 \sim 130$ °C,入口烟气速度为 2.6 m/s,每个喷嘴的最小喷淋密度为 $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。考虑到烟气中 SO_2 浓度的变化,并且保证 SO_2 处理彻底,因此在整个塔中设置 4 层液体喷嘴。

根据脱硫塔的设计结果,计算塔内压力分布。

除雾器阻力为:

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta Z} = \frac{0.17775 \rho_g}{S \varepsilon^2 (\sin \theta)^2} U_{gs}^2 + \frac{88.774 \mu_g}{S^2 \varepsilon \sin \theta} U_{gs} = 122 \text{ Pa} \quad (19)$$

总压降为:

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = \frac{\Delta P_d / \Delta Z}{(1 - (0.614 + 71.355) h_1)^5} = 961 \text{ Pa} \quad (20)$$

在船舶锅炉中,如果选择含硫量较低的煤,或者掺杂其他优质燃料,那么文中所处理的烟气含硫量必然会大幅度降低。因此,设置含硫量浓度降低为原来的 1/2,即 $1000 \text{ mg}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$ (SO_2 摩尔分数为 3.4×10^{-4}),进行脱硫工况模拟,优化喷淋层的启停工艺,从而降低船舶脱硫的运行费用。

不同喷淋层投用情况组合及喷淋量对脱硫效果的影响如图 3 所示。当不改变每层的喷淋量而关闭喷淋层时,出口处 SO_2 的浓度为 $60 \sim 100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。其中投用第 1、3 层时,效果最好,而投用第 3、4 层时,效果最差。同时,从理论上来说,当增加喷淋量时,

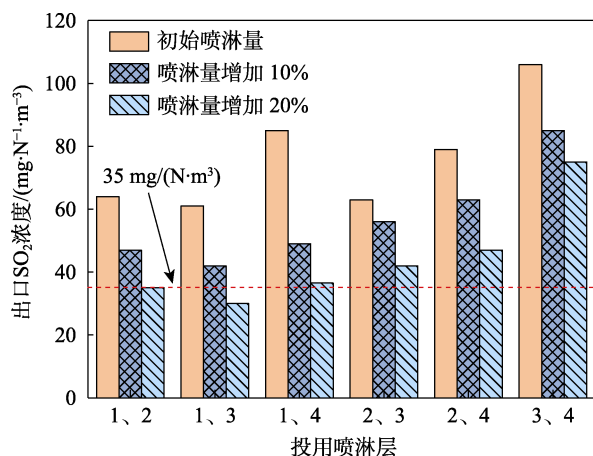
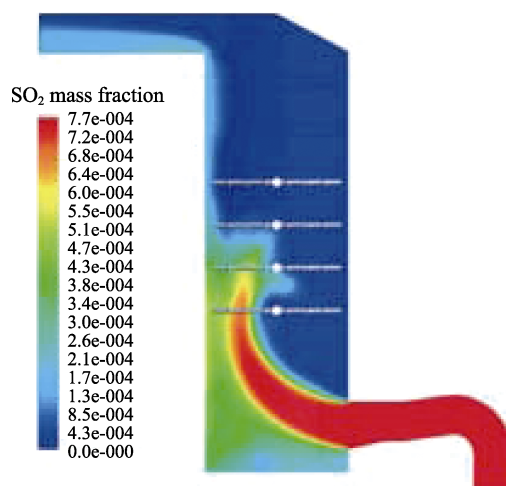


图 3 投用层组合与喷淋量对脱硫效果的影响

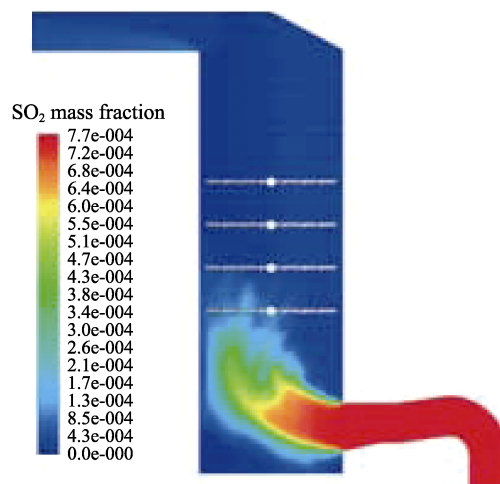
Fig.3 Influence of combination of operating layer and spraying amount on desulfurization effect

能够有效降低二氧化硫浓度。从数值计算结果可以看出,当喷淋量提高 10% 时,脱硫塔出口 SO_2 浓度降低至 $40 \text{ mg}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$;而当提高 20% 时,投用 1、3 或 1、2 层,均能满足 $35 \text{ mg}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$ 的排放指标,但是投用 3、4 层时,排放值仍高达 $70 \text{ mg}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$ 。

投用不同喷淋层产生的脱硫效率差异可以通过塔内流场分布来分析。不同喷淋层投用方式下,塔内 SO_2 浓度分布和速率分布云如图 4 和图 5 所示。当投用第 3、4 层时,塔内 SO_2 浓度分布非常不均匀,在偏离进口烟道的区域, SO_2 浓度过高。原因是当使用 1/2 层喷淋层时,脱硫塔下部喷雾对烟气的均流作用变差,导致烟气在塔内速度分布不均,外侧烟气流速过高,因此该区域烟气停留时间缩短,使脱硫效果恶化。当投用第 1、3 层时,由于第 1 层的浆液喷雾首先对烟气进行了均流,流场分布均匀性比投用第 3、4 层时大幅提高。此时,塔内 SO_2 能够被均匀脱除,达到较高的脱硫效率。



a 投用第 3、4 层



b 投用第 1、3 层

图 4 投用不同喷淋层时 SO_2 浓度分布

Fig.4 Distribution of SO_2 concentration when applying different spray layers: a) applying 3rd and 4th tayers; b) applying 1st and 3rd tayers

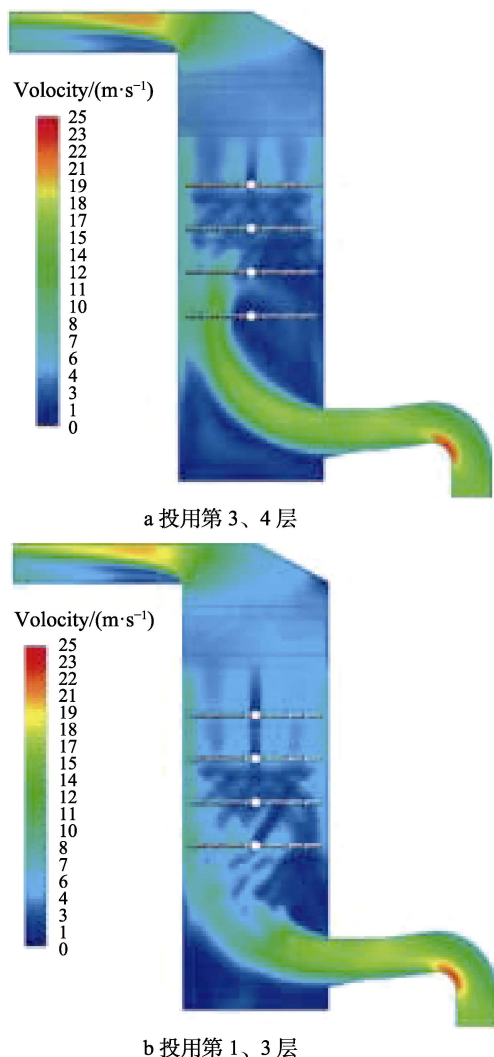


图5 投用不同喷淋层时流速分布

Fig.5 Distribution of flow velocity when applying different spray layers: a) applying 3rd and 4th tayers; b) applying 1st and 3td tayers

3 结论

1) 在船舶柴油机的烟气量为 1.2×10^5 kg/h、 SO_2 的摩尔分数为 6.8×10^{-4} 的条件下, 从塔径 (3.8 m)、填料层类型 (Mellapak) 和高度 (1.01 m)、液体喷嘴数量 (9 个)、除雾装置 (9 m^2) 4 个方面对船舶海上用填料塔进行了相关参数设计和计算, 设计得到的填料塔总压降为 961 Pa, 除雾器阻力为 122 Pa。

2) 如果脱硫塔入口 SO_2 摩尔分数降低为 3.4×10^{-4} , 则可以只投用第 1、3 层, 或第 1、2 层, 并将每层喷淋量增加 20%, 可使排放值低于 $35 \text{ mg}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$ 。

参考文献:

- [1] 郭鲁钢, 王海增, 朱培怡, 等. 海水脱硫技术现状[J]. 海洋技术, 2006, 25(3): 10-14.
GUO Lu-gang, WANG Hai-zeng, ZHU Pei-yi, et al. Ap-

- plication of seawater FGD process[J]. Ocean technology, 2006, 25(3): 10-14.
- [2] 郑安荣, 巩磊. 海水烟气脱硫及应用前景[J]. 工业安全与环保, 2007, 33(10): 8-10.
ZHENG An-rong, GONG Lei. The sea water flue gas desulfurization and its application prospect[J]. Industrial safety and environmental protection, 2007, 33(10): 8-10.
- [3] 张彦锋, 沈天临, 任国柱, 等. 国内外主流烟气脱硫技术现状及发展趋势[J]. 辽宁城乡环境科技, 2004, 24(5): 53-56.
ZHANG Yan-feng, SHEN Tian-lin, REN Guo-zhu, et al. Review for popular flue-gas-desulfurization technology[J]. Liaoning urban and rural environmental science & technology, 2004, 24(5): 53-56.
- [4] 刘乃鸿. 工业塔新型规整填料应用手册[M]. 天津: 天津大学出版社, 1993.
LIU Nai-hong. Industrial tower new type of structured packing application manual[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1993.
- [5] 王树楹. 现代填料塔技术指南[M]. 北京: 中国石化出版社, 1998.
WANG Shu-ying. Technical guide for modern packed towers[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1998.
- [6] 刘忠生, 王忠福, 林大泉. 催化裂化烟气海水洗涤的脱硫工艺[J]. 炼油设计, 1997, 27(1): 67-70.
LIU Zhong-sheng, WANG Zhong-fu, LIN Da-quan. Fcc flue gas desulfurization by seawater scrubbing[J]. Petroleum refinery engineering, 1997, 27(1): 67-70.
- [7] 王亮. 海水体系对二氧化硫吸收性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
WANG Liang. The absorption behavior of SO_2 in seawater systems[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [8] 李彩玲. 船舶废气洗涤脱硫填料塔设计及研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
LI Cai-ling. The design and research on packed tower of marine exhaust gas scrubbing desulfurization[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [9] 姚玲玉, 张丽, 董丽华. 船舶尾气脱硫履约技术研究[J]. 科技信息, 2012(11): 196-197, 192.
YAO Ling-yu, ZHANG Li, DONG Li-hua. Investigation on technology of desulfurization performance from ship emissions[J]. Science & technology information, 2012(11): 196-197, 192.
- [10] BRAVO J L, ROCHA J A, FAIR J R. A comprehensive model for the performance of columns containing structured packings[J]. ICHIME symposium, 1992, 128: 489-507.
- [11] 郝建宽. 海水脱硫技术在沿海火电厂中的应用[J]. 东北电力技术, 2007, 28(5): 11-13.
HAO Jian-kuan. Application of sea-water de-sulfurization technology to coastal power plant[J]. Northeast electric power technology, 2007, 28(5): 11-13.

- [12] 谭天恩. 化工原理. 下册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
TAN Tian-en. Principles of chemical engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [13] 周志华. 海水脱硫中吸收塔脱硫效率的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
ZHOU Zhi-hua. The study of desulphurization efficiency by seawater in absorption tower[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [14] CORBETT J J, WINEBRAKE J J, GREEN E H, et al. Mortality from ship emissions: A global assessment[J]. Environmental science & technology, 2007, 41(24): 8512-8518.
- [15] DAVIS D D, GRODZINSKY G, KASIBHATLA P, et al. Impact of ship emissions on marine boundary layer NO_x and SO_2 Distributions over the Pacific Basin[J]. Geophysical research letters, 2001, 28(2): 235-238.
- [16] LAPUERTA M, ARMAS O, RODRIGUEZ-FERNANDEZ J. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions[J]. Progress in energy and combustion science, 2008, 34(2): 198-223.
- [17] BARTHOLOMEW K, PANAGIOTOPOULOS A. Options for lower-sulphur marines fuels[J]. Petroleum technology quarterly, 2011, 16(5): 12-19.
- [18] KALLIGEROS S, ZANNIKOS F, STOURNAS S, et al. An investigation of using biodiesel/marine diesel blends on the performance of a stationary diesel engine[J]. Biomass and bioenergy, 2003, 24(2): 141-149.
- [19] HENRIKSSON T. SO_x scrubbing of marine exhaust gases[J]. Wartsila technical journal, 2007(2): 55-58.
- [20] SRIVASTAVA R K, JOZEWICZ W, SINGER C. SO_2 scrubbing technologies: A review[J]. Environmental progress, 2001, 20(4): 219-228.
- [21] SRIVASTAVA R K, JOZEWICZ W. Flue gas desulfurization: The state of the art[J]. Journal of the air & waste management association, 2001, 51(12): 1676-1688.