

船舶废气填料塔设计及脱硫性能仿真分析

吴林, 刘盛华, 徐争光, 杨国华, 张立东, 闫雪松
(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:为研究船舶混合模式脱硫过程中使用海水脱硫的主要参数(废气量、入口二氧化硫浓度、液气比)以及使用碱液脱硫的主要参数(循环液 pH、废液排出量、液气比)对脱硫塔脱硫效率的影响,使用化工流程模拟软件 Aspen Plus V10 对 W6X35 型船用柴油机废气填料塔脱硫过程进行了模拟分析并根据模拟结果对运行参数进行了优化。模拟结果表明:海水脱硫时,液气比是重要调控参数,应根据负荷、油含硫量变化相应地在 3~7 L/Nm³ 范围内调节合适的液气比。碱液脱硫时,废液排放量是一个重要参数,对脱硫效率、亚硫酸钠饱和和结晶及废水处理量影响大,运行时应控制在 0.105~0.152 kg/kW·h 范围内并维持在低值;循环液 pH、液气比对脱硫效率和运行经济性影响较大,循环液 pH 以 6.5 为宜、液气比以 3~4 L/Nm³ 为宜。

关键词:船舶脱硫;填料塔;海水/碱液;脱硫效率

中图分类号:X736.3

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2023.01.017

Design of ship waste-gas cleaning packing tower and desulfurization performance simulation

WU Lin, LIU Shenghua, XU Zhengguang, YANG Guohua, ZHANG Lidong, YAN Xuesong
(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to investigate the impact of the parameters of seawater desulfurization process, such as exhausted air quantity, inlet SO₂ concentration and liquid to gas ratio, and the parameters of alkaline liquor desulfurization process, such as pH value of Circulating liquid, waste liquid discharge, liquid to gas ratio, on the efficiency of desulfurization tower, simulation of desulfurization process in the packing tower for W6X35 diesel engine is carried out by means of chemical process simulation software Aspen Plus V10. The parameters are optimized through the simulation. The simulations reveal that, for seawater desulfurization, the liquid to gas ratio is an important control parameter, that should be adjusted within the range of 3~7 L/Nm³ according to processing load and fuel sulfur content, while for alkaline liquor desulfurization, waste liquid discharge has the greatest impact on desulfurization efficiency, Na₂SO₃ crystallization from the saturated solution and waste liquid treatment load and should be adjusted within the range of 0.105~0.152 kg/kW·h, the lower end being preferable. pH value of circulating liquid and liquid to gas ratio affect the desulfurization efficiency and operation economy rather significantly and preferred values are 6.5 for pH value of circulating liquid and 3~4 L/Nm³ for liquid to gas ratio.

Key words: desulfurization for ship; packing tower; seawater/alkaline liquor; desulfurization efficiency

随着全球经济的不断发展,地区间以及国家间的贸易合作日益紧密,航运事业取得了空前的发展,但船舶主要以硫、重金属等含量较高的重油为燃料,燃烧产生的大量硫氧化物(SO_x)、氮氧化物(NO_x)

以及颗粒物(PM)等污染物排放十分严重^[1-2]。为了控制船舶硫排放,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)于2008年在第85届海上环境保护委员会上通过了《国际防止船舶造成污

收稿日期:2021-08-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0205800)

作者简介:吴林(1995—),女,四川绵阳人,硕士研究生,研究方向为能源利用与环境保护。E-mail:18482166564@163.com

通信作者:杨国华(1961—),男,浙江嵊州人,教授,博士,研究方向为能源利用与环境保护。E-mail:yangguohua@nbu.edu.cn

引用格式:吴林,刘盛华,徐争光,等.船舶废气填料塔设计及脱硫性能仿真分析[J].中国航海,2023,46(1):120-126.

WU Lin, LIU Shenghua, XU Zhengguang, et al. Design of ship waste-gas cleaning packing tower and desulfurization performance simulation [J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 120-126. (in Chinese)

染公约》(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL) 附则 VI 2008 修正案,规定自 2020 年全球海域燃油含硫量上限为 0.5%,其中排放控制区(Emission Control Area, ECA)燃油含硫量上限为 0.1%^[3]。为应对 IMO 的全球限硫令,可使用低硫油、液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)、生物燃料等低硫燃料替代高硫重油,或使用经批准的船舶废气脱硫技术^[4],以降低船舶动力装置排气中的 SO_x,满足 IMO 的 SO_x 排放标准。但使用低硫燃油成本高,采用天然气等替代燃料需要全方面改造船舶动力系统,相对而言,船舶废气脱硫技术更具有技术经济优势,应用前景广阔^[5]。

船舶尾气脱硫主要采用湿法脱硫,湿法脱硫分为采用海水洗涤的开式系统^[6]、采用碱液洗涤的闭式系统^[7]和采用混合洗涤的混合系统^[8]。开式系统利用海水对废气进行洗涤脱硫,具有系统简单稳定、脱硫成本低和可满足非排放控制区要求等优点^[9];闭式系统在洗涤液中添加碱性物质以提高洗涤液碱性,脱硫效率高。针对各个国家和地区关于船舶废气清洗系统(Exhaust Gas Cleaning Systems, EGCS)出台的相关限制法规,船舶安装闭环模式或混合模式的 EGCS 在今后将成为主要趋势。

目前,对船舶尾气海水脱硫过程和碱液脱硫过程模拟与优化的研究相对较少^[10],刘学^[11]以 MAN 6S25MC 柴油机为目标对象进行了船舶废气脱硫系统设计和试验,研究结果表明,发动机全工况下,废气经洗涤后 SO₂ 浓度都维持在 7×10^{-6} 以内,脱硫效率均在 99% 以上。ZHOU J X 等^[12]通过 U 型 EGCS 研究了在闭环模式下液气比、氢氧化钠(NaOH)溶液 pH 值、进口 SO₂ 浓度和液相温度对脱硫效率的影响,对试验结果分析得出闭环模式下的最佳操作参数为液气比 1.5 ~ 2.5 L/Nm³、NaOH 溶液 pH 值 6.5 ~ 7.5。CHU G W 等^[13]在旋转填料床中以 Na₂SO₃ 为吸收剂,研究了 Na₂SO₃ 浓度和溶液 pH 值对脱硫效率的影响。试验结果显示,随着 Na₂SO₃ 的浓度升高,脱硫效率不断提高,当溶液 pH 值从 5.5 升高至 6.5 时,脱硫效率出现明显上升,溶液 pH 值大于 6.5 之后,脱硫效率上升趋势不明显。

本文运用化工流程模拟软件 Aspen Plus V10 对海水脱硫过程和 NaOH 碱液脱硫过程的主要影响参数进行了仿真分析,为实际工程设计提供了理论依据。

1 工艺设计及计算

1.1 设计参数

1.1.1 废气参数

选用 W6X35 型船用柴油机为研究对象,设计时

拟定航行过程中燃烧含硫量为 3.5% 的重质燃料油(Heavy Fuel Oil, HFO),在 100% 负荷下所产生的废气经填料塔洗涤后达到硫排放控制区(Sulfur Emission Control Area, SECA)硫排放等效于燃油含量限值 0.1% 的排放标准^[14],脱硫效率应在 97.1% 以上,填料塔设计时取 98%。4 303 kW 的 W6X35 型船用柴油机满负荷产生的废气量为 25 818 Nm³/h,废气温度为 300 ℃,废气经脱硫系统冷却段蒸发冷却后温度为 50 ℃,压力为 101.325 kPa。模拟废气主要成分组成见表 1。

表 1 模拟废气主要成分

Tab. 1 The main component of the simulation exhaust gas
单位:%

氮气 (N ₂)	氧气 (O ₂)	二氧化碳 (CO ₂)	二氧化硫 (SO ₂)	水 (H ₂ O)
77.316	13	4.614	0.07	5

1.1.2 海水参数

模拟使用的海水碱度为 2.37 mmol/L,海水进塔温度为 25 ℃,海水密度为 1 025 kg/m³,海水表面张力为 0.072 N/m,海水黏度为 0.893×10^{-3} Pa · s。

1.2 填料塔设计计算

本文设计的填料塔需要采用海水和 NaOH 水溶液两种吸收剂进行脱硫,脱硫系统原理如图 1 所示。当船舶在允许外排脱硫废水的海域航行时,采用开环模式运行,即打开阀门 1、3、4、5,关闭阀门 6、7,以海水作为洗涤液进行脱硫,脱硫废液进入废液处理单元处理,经检测合格后排入大海;而当船舶在不允许外排脱硫废水的海域航行时,采用闭环模式运行,即打开阀门 3、4、6、7,关闭阀门 1、5,使用 NaOH 水溶液作为洗涤剂,将产生的废液储存在废液箱中,直到船舶进入废液可排放区再打开阀门 5,废液经废液处理单元处理后排入大海。

在相同条件下,采用海水脱硫所需的液气比要大于采用 NaOH 水溶液脱硫所需的液气比,而填料塔泛点气速随着液气的质量和流量之比的增大而减小,显然海水脱硫所需填料塔塔径要大于 NaOH 水溶液脱硫所需填料塔塔径,因此本文采用海水作为吸收剂对填料塔尺寸进行设计计算。

1.2.1 填料选择

采用直径 50 mm 的哈凯登填料作为塔填料,比表面积为 157 m²/m³,空隙率为 94%,填料因子为 52.5/m。

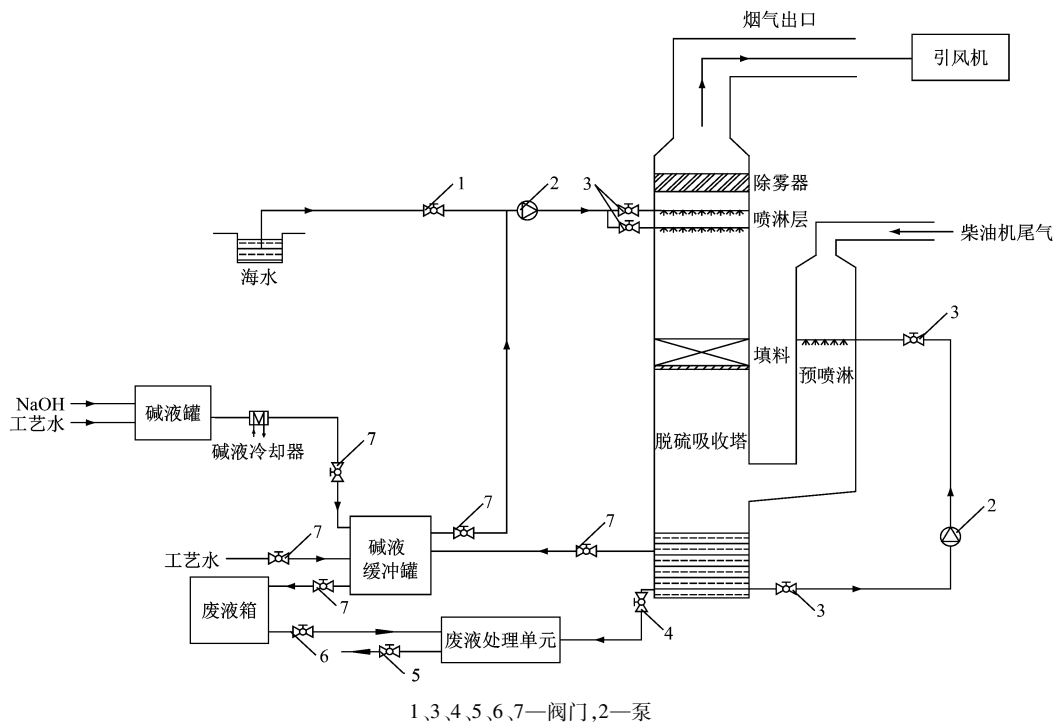


图1 混合模式脱硫系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of mixed mode desulfurization system

1.2.2 填料层高度计算

根据海水与 SO_2 的相平衡数据,采用多项式拟合得到平衡曲线为

$$Y = -2 \times 10^{12} X^4 + 7 \times 10^8 X^3 - 13490 X^2 + 0.721 2 X + 6 \times 10^{-7} R^2 = 0.994 \quad (1)$$

式中: Y 表示气相中 SO_2 摩尔分数, X 表示液相中 SO_2 摩尔分数, R 表示相关系数。使用下标1表示塔底端,下标2表示塔顶端,由设计要求中给定的废气体积、 SO_2 浓度及分离要求可知: $Y_1 = 0.0007$, $Y_2 = 0.000014$, $X_2 = 0$,得出操作线方程为: $0.0007 = \frac{L}{G} X + 0.000014$,在 $Y = 0.0007$ 时,通过理论操作线与平衡线的交点可求出填料塔出口液体中 SO_2 摩尔比 $X_1 \approx 0.000120876$,最小液气比 $(L/G) \approx 5.675$ 。根据生产经验,一般取海水用量为最小海水用量的110%~200%,取150%可得实际操作液气比,换算为体积比为 6.75 L/m^3 ,推算得到海水喷淋量为 2905 L/min 。

通过图解积分法得到传质单元数为4.07,根据相关经验公式求得传质单元高度为0.36 m,填料高度 = 传质单元数 \times 传质单元高度 = 1.53 m,取整为1.6 m。

1.2.3 填料塔直径计算

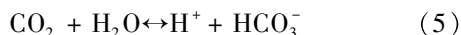
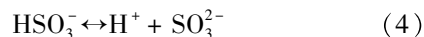
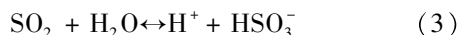
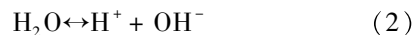
使用的哈凯登填料为散堆填料,采用泛点气速法计算泛点气速,计算值为 $u = 4.13 \text{ m/s}$ 。对于散堆填料的操作气速,通常取泛点气速的60%~85%(取

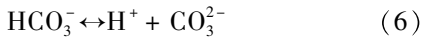
65%), $u \approx 2.69 \text{ m/s}$,带入式 $D = \sqrt{\frac{4V}{\pi u}}$ 中,得到填料塔直径为1.95 m,取整为2 m。 D 为填料塔直径,m; V 为废气体积流量, m^3/s ; u 为操作空塔气速, m/s 。

1.3 模拟系统及条件

ASPEN PLUS 混合模式脱硫系统模型主要运作流程为,海水脱硫时,高温废气在冷却段由冷却液冷却产生饱和废气,从塔底进入填料塔,与从塔顶进入填料塔的海水逆流接触,脱硫后经烟气排出填料塔,海水输入,通入填料塔洗涤烟气后,洗涤液从塔底经废液全部排出,此时循环液、 NaOH 和 H_2O 均设置为空物流。碱液脱硫时,废气流向与海水脱硫时一致,洗涤液一部分经循环液与 NaOH 的新鲜碱液、 H_2O 的淡水混合后进入填料塔再循环,一部分作为废液排出,此时海水设置为空物流。

在尾气洗涤过程中做如下假设:不考虑尾气中的颗粒物;认为尾气中的 SO_x 只存在 SO_2 ;在吸收过程中不考虑亚硫酸根离子 (SO_3^{2-}) 和亚硫酸氢根离子 (HSO_3^-) 的氧化作用;不考虑海水中离子的催化氧化; NaOH 水溶液吸收只发生下列反应(2)~(4),海水吸收发生下列反应(2)~(6)。





1.4 模拟验证

本文对尚政伟等^[15]进行的海水单级洗涤小试进行了模拟,采用直径 25 mm 的哈凯登填料作为塔填料,模拟小试参数详情见表 2。用上述混合模式脱硫系统模型模拟脱硫效率随废气中 SO₂ 浓度的变化,小试结果与模拟结果如图 2 所示。

表 2 模拟小试主要参数

Tab.2 Main parameters of simulation tests

废气量/(Nm ³ /h)	700	废气温度/°C	37
海水碱度/(mmol/L)	0.84	海水温度/°C	25
填料塔直径/m	0.35	填料厚度/m	0.9
液气比/(L/Nm ³)	5		

由图 2 可看出,不同 SO₂ 浓度脱硫效率模拟值与试验值之差不超过 3.5%,说明该模型能够较好地模拟真实的脱硫过程。

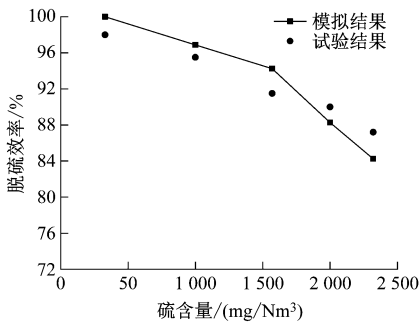


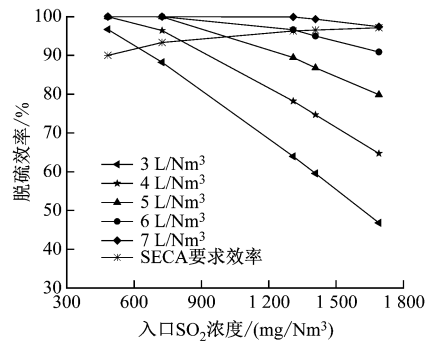
图 2 小试结果与模拟结果

Fig.2 Small-scale results and simulation results

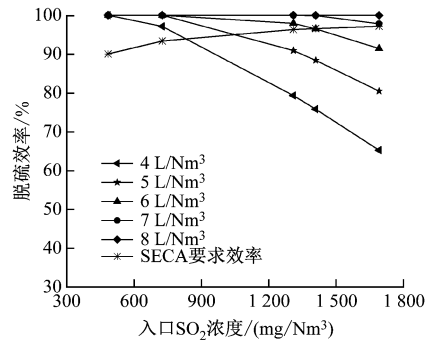
2 脱硫效果影响因素分析

2.1 海水脱硫

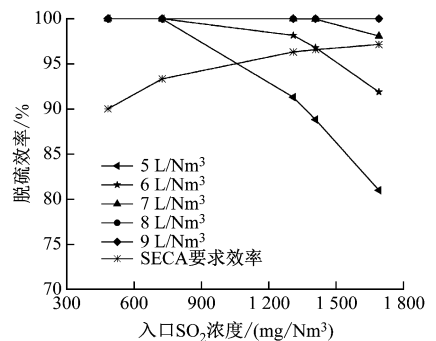
主要分析柴油机负荷(废气量)、废气入口 SO₂ 浓度变化时液气比的调节问题对海水脱硫过程的影响,主要参数如下:100% 负荷时模拟废气量为 25 818 Nm³/h,废气温度为 50°C,填料为直径 50 mm 的哈凯登填料,海水碱度为 2.37 mmol/L。填料塔脱硫效率与废气入口 SO₂ 浓度、液气比的关系如图 3 所示。由图 3 可看出,在废气入口 SO₂ 浓度在 482.97 mg/Nm³ ~ 1 690.4 mg/Nm³ 范围内,废气量一定时,在同一液气比下,填料塔脱硫效率随着 SO₂ 浓度减小而增大,且液气比越小,增大越明显,而在同一 SO₂ 浓度下,脱硫效率随液气比的增大而增大,这都是因为吸收剂总量相对于废气中硫总量越大,SO₂ 吸收越快越充分。



a) 废气量为 25 818 Nm³/h



b) 废气量为 12 909 Nm³/h



c) 废气量为 7 745.4 Nm³/h

图 3 脱硫效率随废气量、入口 SO₂ 浓度和液气比变化的变化

Fig.3 The desulfurization efficiency varies with exhaust, gas volume, inlet SO₂ concentration and the change with liquid-gas ratio

以 SECA 硫排放等效于燃油含量限值 0.1% 的排放标准计算不同入口 SO₂ 浓度达标时的脱硫效率,形成曲线 SECA 要求效率,曲线上部满足 SECA 硫排放标准。根据图 4,不同入口 SO₂ 浓度经填料塔洗涤后达到 SECA 排放标准时对应的液气比整理为表 3。

由表 3 可看出,入口 SO₂ 浓度低于 724.458 mg/Nm³,废气量较大时,液气比较小,废气量较小时,液气比较大;这是因为废气量小时较小的液气比无法满足液体喷淋密度的要求,造成填料塔润湿不均匀,不利于 SO₂ 的吸收,填料塔脱硫效率降低。入口 SO₂ 浓度较高,废气量较大时,液气比较大;这是

因为 SO_2 浓度越高,废气量越大,废气中硫总量越大,需要较高的液气比才能满足 SECA 排放标准。

表 3 不同情况下达到 SECA 排放标准时对应的液气比

Tab.3 Liquid-gas ratio of the system up to SECA

入口 SO_2 浓度/ (mg/Nm^3)	废气量为	废气量为	废气量为
	7 745.4 Nm^3/h 的 液气比/ (L/Nm^3)	12 909 Nm^3/h 的 液气比/ (L/Nm^3)	25 818 Nm^3/h 的 液气比/ (L/Nm^3)
482.97	5	4	3
724.458	5	4	4
1 308.85	6	6	6
1 407.86	6	7	7
1 690.4	7	7	7

2.2 碱液脱硫

主要分析碱液脱硫时循环液 pH、废液排出量、液气比对脱硫塔脱硫效率的影响,碱液脱硫以 NaOH 为吸收剂,主要参数如下:模拟废气量为 $25\,818\ \text{Nm}^3/\text{h}$, SO_2 浓度为 7×10^{-4} ,入口废气温度为 $50\ ^\circ\text{C}$,填料为直径 $50\ \text{mm}$ 的哈凯登填料,循环液温度为 $35\ ^\circ\text{C}$ 。

钠碱液脱硫采用碱液闭式循环,循环液中主要包含 Na_2SO_3 和亚硫酸氢钠 (NaHSO_3),两者的比例取决于循环液的 pH 值,pH 值大,则 Na_2SO_3 比例大,而 pH 值可以通过添加 NaOH 调节。循环液中吸收 SO_2 的主要成分是 Na_2SO_3 ,反应生成 NaHSO_3 ^[16],从脱硫反应看,循环液中的 Na_2SO_3 浓度高一些有利于脱硫,但与循环液温度以及 pH 值相对应,存在 Na_2SO_3 浓度饱和值,在 Na_2SO_3 浓度饱和值下继续吸收 SO_2 ,过饱和的 Na_2SO_3 就会在吸收塔内壁、填料层、喷嘴结晶^[17],造成设备堵塞,脱硫效率下降,影响脱硫系统稳定运行,因此要排出一部分循环液,排出的部分即为废液,同时添加相应的 NaOH 水溶液,以维持循环液的 pH 值和 Na_2SO_3 浓度,并使 Na_2SO_3 浓度低于饱和浓度。当循环液的 pH 值保持不变时,废液排出量直接影响 Na_2SO_3 浓度,继而影响脱硫效率,因此,废液排出量是一个重要控制参数,不仅关系到脱硫效率,也关系到系统的稳定运行,还关系到废液的处理费用。填料塔脱硫效率与循环液 pH、废液排出量、液气比的关系如图 4 所示。

由图 4 可知,无论循环液采用何种 pH,脱硫塔脱硫效率都随废液排出量减少、液气比增大而增加,

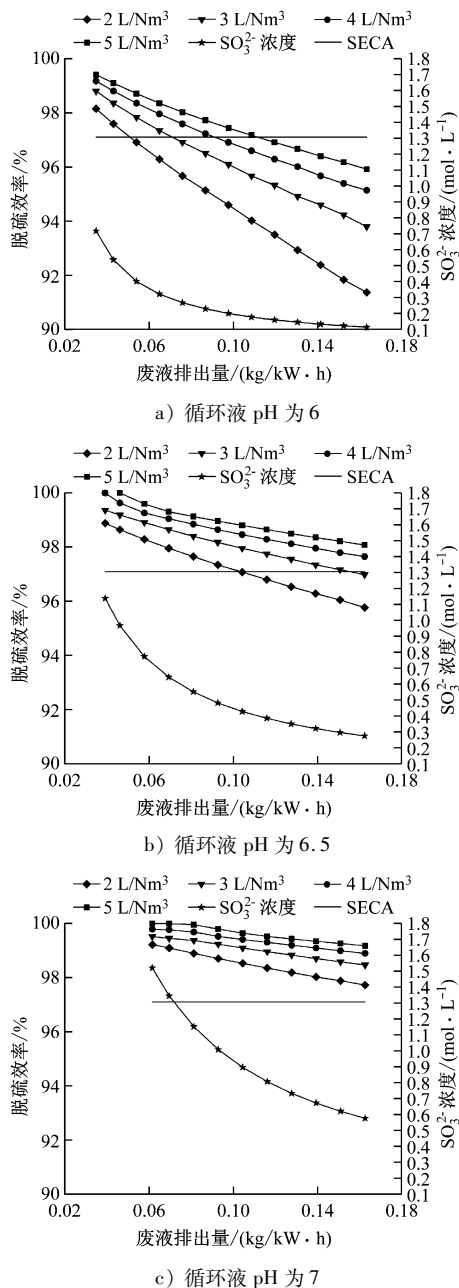


图 4 脱硫效率随循环液 pH 值、废液排出量和液气比变化的变化

Fig. 4 The desulfurization efficiency of the desulfurization tower the pH of the circulating liquid, the discharge amount of the waste liquid and the change with liquid-gas ratio

且循环液 pH 越小,增加越明显,废液排出量一定时,同液气比条件下,填料塔脱硫效率随循环液 pH 值的增大而增加,这都是因为循环液中 SO_3^{2-} 总量相对增加,化学反应增强因子变大, SO_2 传质速率加快,脱硫效率提高。

以 SECA 硫排放等效于燃油含量限值 0.1% 的排放标准计算,达标效率为 97.14% 。由图 4 可知,循环液 pH 为 6 时,大部分区域位于达标线下,不满足 SECA 排放要求;循环液 pH 为 6.5 时,已有大部

分区域可满足脱硫要求;循环液 pH 为 7 时,在液气比为 $2 \sim 5 \text{ L/Nm}^3$,废液排放量为 $0.06 \sim 0.16 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$ 范围内,均达标。循环液低碱度时,若达到排放标准,应减少废液排放量或增大液气比,但废液最小排放量受到 Na_2SO_3 最大溶解度的限制,另外废液最小排放量还要考虑循环液的黏度和密度,从工程经验看,循环液密度不宜超过 1200 kg/m^3 ,否则循环液流动性变差,易造成喷淋不均匀,脱硫效率降低,而增大液气比会增加泵能耗,故循环液 pH 不宜过低,但增大 pH 会增加废碱液中亚硫酸根离子的损失,增加碱消耗,还会使 Na_2SO_3 溶解度降低,限制反应物 SO_3^{2-} 浓度升高,同时易结晶堵塞填料层和喷嘴,不利于脱硫,综合上述分析,循环液 pH 为 6.5 较适宜。

在循环液 pH 为 6.5 时,考虑到循环液的流动性,废液排放量下限宜取 $0.105 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$,此时的循环液密度为 1196 kg/m^3 ,满足密度要求,循环液中 SO_3^{2-} 浓度为 0.43 mol/L ,低于循环液中 Na_2SO_3 饱和浓度 1.139 mol/L ,废液排放量上限取决于硫排放要求,在本例所述条件和要求下,废液排放量上限可取 $0.152 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$,以保证脱硫效率达到 97.1% 以上,满足 SECA 的排放要求。在废液排放量上下限取值范围内,液气比为 2 L/Nm^3 时的脱硫效率较低,不能达标,液气比为 $3 \sim 5 \text{ L/Nm}^3$ 可满足脱硫要求,考虑泵能耗,液气比为 $3 \sim 4 \text{ L/Nm}^3$ 较适宜。

3 结束语

1) 海水脱硫时,液气比是关系到脱硫效率和脱硫成本的重要参数,应根据负荷、油硫含量的变化相应调节合适的液气比,废气入口 SO_2 浓度在 $482.97 \sim 1690.4 \text{ mg/Nm}^3$ 范围变化时,100% 负荷时液气比应在 $3 \sim 7 \text{ L/Nm}^3$ 范围内相应调节,50% 负荷时液气比应在 $4 \sim 7 \text{ L/Nm}^3$ 范围内相应调节,30% 负荷时液气比应在 $5 \sim 7 \text{ L/Nm}^3$ 范围内相应调节。

2) 钠碱液脱硫时,循环液 pH 对脱硫过程有较大影响,循环液 pH 以 6.5 为宜,废液排放量对脱硫效率、 Na_2SO_3 饱和结晶及废液处理量影响很大,需要兼顾三者,在脱硫系统运行中废液量宜控制在 $0.105 \sim 0.152 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$ 范围内,并且尽可能取低值,液气比在 $3 \sim 4 \text{ L/Nm}^3$ 范围内较适宜。

参 考 文 献

[1] 牟军敏,张新生,姚鑫,等. 基于航行数据的北极地区船舶排放清单[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(5): 116-124.

MOU J M, ZHANG X S, YAO X, et al. Emission inventory of ship based on navigation data in Arctic region [J]. Journal of Transportation Engineering, 2019, 19(5): 116-124. (in Chinese)

[2] 汪宗御,张继锋,纪玉龙. 船舶尾气污染物排放控制研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(6): 2289-2297. WANG Z Y, ZHANG J F, JI Y L. Research progress of emission control on ship exhaust pollutants [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(6): 2289-2297. (in Chinese)

[3] KANG D W, JANG H J, KIM T S. Using compressor discharge air bypass to enhance power generation of a steam-injected gas turbine for combined heat and power [J]. Energy, 2014, 76(C): 390-399.

[4] 吴斌,李欣,王怡. 船舶废气脱硫技术的应用[J]. 航海工程, 2019, 48(2): 48-50. WU B, LI X, WANG Y. Application of ship exhaust gas desulfurization technology [J]. Ship & Ocean Engineering, 2019, 48(2): 48-50. (in Chinese)

[5] 向轶,吕文豪,杨国华,等. 基于湿法脱硫工艺的船舶尾气处理系统设计分析[J]. 四川环境, 2020, 39(3): 97-103. XIANG Y, LYU W H, YANG G H, et al. Design and analysis of marine exhaust gas treatment system based on wet desulfurization process [J]. Sichuan Environment, 2020, 39(3): 97-103. (in Chinese)

[6] LONG N V D, LEE D Y, JIN K M, et al. Advanced and intensified seawater flue gas desulfurization processes: recent developments and improvements [J]. Energies, 2020, 13(22).

[7] 产文兵,万皓,宋桂东,等. 钠碱法烟气脱硫工艺技术[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2013, 19(5): 474-478. CHAN W B, WAN H, SONG G D, et al. FGD process technology with sodium alkaline method [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2013, 19(5): 474-478. (in Chinese)

[8] 黄博伦,杨国华. 船舶废气洗涤脱硫脱硝和脱 PM 细颗粒设备研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(12): 2826-2831. HUANG B L, YANG G H. Research progress of ship exhaust gas cleaning desulfurization denitration and PM removal equipment [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(12): 2826-2831. (in Chinese)

[9] GUAN Y P, LI X M, ZHANG Z C, et al. Application and research progress of seawater desulfurization technology [J]. Electric Power, 2012, 45(2): 40-44.

[10] MISIULIA D, ANTONYUK S, ANDERSSON A G, et

- al. High-efficiency industrial cyclone separator: a CFD study[J]. Powder Technology, 2020, 364: 943-953.
- [11] 刘学. 钠碱法船舶尾气处理技术及试验[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 2017.
LIU X. The technology and experimental study of marine exhaust gas treatment based on natrium-alkali method [D]. Harbin: Harbin Engineering University marine engineering, 2017. (in Chinese)
- [12] ZHOU J X, ZHOU S, ZHU Y Q. Characterization of particle and gaseous emissions from marine diesel engines with different fuels and impact of after-treatment technology[J]. Energies, 2017, 10(8): 1-14.
- [13] CHU G W, FEI J, CAI Y, et al. Removal of SO₂ with sodium sulfite solution in a rotating packed bed[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(6): 2329-2335.
- [14] MARTINEZ A H. Study of exhaust gas cleaning systems for vessels to fulfill IMO III in 2016[D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [15] 尚政伟, 杨国华, 况敏, 等. 柴油机废气梯级洗涤脱硫试验[J]. 热动力工程, 2018, 33(3): 100-104.
SHANG Z W, YANG G H, KUANG M, et al. Experiment of cascade-scrubbing desulfurization performance for diesel engine exhaust gas[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(3): 100-104. (in Chinese)
- [16] 王伟之, 张锦瑞, 张书廷, 等. 填料塔中钠碱溶液脱除烟气中 SO₂ 研究[J]. 化学工程, 2008(1): 67-70.
WANG W Z, ZAHNG J R, ZHANG S T, et al. Research on SO₂ absorption in flue gas by sodium alkali solution in packing column[J]. Chemical Engineering (China), 2008(1): 67-70. (in Chinese)
- [17] 林世华, 罗凯. 影响钠碱法烟气脱硫效率的因素分析与工艺优化[J]. 能源环境保护, 2011, 25(1): 41-44.
LIN S H, LUO K. Analysis of factors that affect desulphurization efficiency of FGD by sodium alkali and optimization of desulphurization system [J]. Energy Environmental Protection, 2011, 25(1): 41-44. (in Chinese)

(上接第 119 页)

- [8] TSAO Y C, THANH V V. A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an uncertain environment[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2019, (124): 13-39.
- [9] KAMRAN S, MEHDI AA, JING XIN D, et al. Integrated strategic and operational planning of dry port container networks in a stochastic environment [J]. Transportation Research Part B: Methodological. 2020, (139): 132-164.
- [10] 李善俊, 陈淮莉. 基于 NSGA II 的带时间窗生鲜品配送路径优化[J]. 上海海事大学学报, 2020, 41(2): 58-64.
LI S J, CHEN Y L. Optimization of fresh food distribution route with time window based on NSGA II [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2020, 41(2): 58-64. (in Chinese)
- [11] 吴小凤. 基于多式联运运输结构调整的内陆港多周期选址研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
WU X F. Study on the multi-period location of inland port based on the adjustment of multimodal transport structure[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020. (in Chinese)
- [12] 孙一然. 基于内陆港的山东省参与“一带一路”的物流网络构建研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
SUN Y R. Shandong Province's participation in logistics network construction based on dry port under the Belt and Road Initiative[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020. (in Chinese)
- [13] 裴健. 基于双层多目标规划模型的内陆港选址研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
PEI J. Study on land port location based on the bi-level multi-objective programming model[D]. Nanjing: Dongnan University, 2016. (in Chinese)
- [14] 王鸿鹏, 孙小清, 李友林. 厦门港腹地拓展对策[J]. 中国航海, 2016, 39(3): 124-127.
WANG H P, SUN X Q, LI Y L. Strategy about expansion of hinterland of Xiamen port[J]. Navigation of China, 2016, 39(3): 124-127. (in Chinese)
- [15] 刘杰, 陈旭梅, 方曾利, 等. 区域城市轴辐式货运网络模型构建与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(9): 1-7.
LIU J, CHEN X M, FANG Z L, et al. Model design and application of regional hub-and-spoke freight network [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 1-7. (in Chinese)
- [16] 梁晨, 刘小娟, 龚艳侠, 等. 京津冀多枢纽混合轴辐式物流网络的构建[J]. 中国流通经济, 2019, 33(6): 118-126.
LIANG C, LIU X J, GONG Y X, et al. Construction of multi-hub hybrid spoke logistics network in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. China Business and Market, 2019, 33(6): 118-126. (in Chinese)