# 船用6135型脱碳塔的性能优化\*

王忠诚,李品友,李 珂,冯经淞

(上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘 要:基于船用6135型脱碳塔能够快速、有效地降低船舶CO<sub>2</sub>排放,已成为当前船舶碳减排的研 究热点。以《MARPOL73/78公约》附则VI关于船舶CO<sub>2</sub>的排放要求为目标,采用NaOH溶液对船舶尾气 中的CO<sub>2</sub>进行捕集。在研究了NaOH溶液与CO<sub>2</sub>气液两相传质的基础上,通过数值模拟与实验相结合的 方法对船用脱碳塔性能进行优化。本文分别研究了脱碳塔的烟气进气入口形式、入口倾斜角度、喷嘴喷 雾锥角与喷嘴的布置方式改变对脱碳塔脱碳效率的影响。研究结果表明,烟气进气入口形式为切入式进 气、入口倾斜角度为15°、喷嘴喷雾锥角为90°、最上部的喷嘴向上喷射且高度与中部喷嘴位于同一水平 面时,脱碳塔的脱碳效率能够提高4.42%,数值模拟结果与实验结果较吻合。

关键词:船舶脱碳;脱碳塔;脱碳效率;数值模拟;性能优化
中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2021) 06-1425-10
DOI: 10.13675/j.enki. tjjs. 200379

## **Performance Optimization of Marine 6135 Decarbonization Tower**

WANG Zhong-cheng, LI Pin-you, LI Ke, FENG Jing-song

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The ship 6135 decarbonization tower based on quick and effective effect can reduce the ship  $CO_2$  emissions, which becomes the current research focus of ship  $CO_2$  emission reduction.  $CO_2$  emission requirements of ships in Annex VI of (MARPOL 73/78) Convention are taken as the target, the capture of  $CO_2$  from ship's emission is studied by using NaOH solution. After the study of the gas-liquid two-phase mass transfer of NaOH solution and  $CO_2$ , the performance optimization of the existing decarburization tower is researched by the method of numerical simulation and experimental research. The effects of the entrance form and the angle of exhaust gas intake, the spray cone angle and the layout of nozzle on decarburization efficiency of decarburization tower are optimized. The results show that the entrance of the exhaust gas is in the form of cut in intake, the entrance angle is 15°, the nozzle spray cone angle is 90°, and the top nozzle is rearranged to spray upward, and the height is at the same level with the middle nozzle, the decarburization efficiency of the decarburization tower is improved by 4.42%. The numerical simulation results are in good agreement with the test results.

Key words: Ship decarbonization; Decarburization tower; Decarburization efficiency; Numerical simulation; Performance optimization

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-05-28; 修订日期: 2020-08-25。

基金项目:上海市科委基金(17170712100)。

作者简介: 王忠诚,博士,副教授,研究领域为船舶污染物排放控制。E-mail: wangzhongchengwzc@163.com

通讯作者:李品友,硕士,副教授,研究领域为船舶动力装置技术。E-mail: pyli@shmtu.edu.cn

引用格式: 王忠诚,李品友,李 珂,等.船用6135型脱碳塔的性能优化[J].推进技术,2021,42(6):1425-1434. (WANG Zhong-cheng, LI Pin-you, LI Ke, et al. Performance Optimization of Marine 6135 Decarbonization Tower[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(6):1425-1434.)

### 1 引 言

船舶在运输途中所产生的 CO<sub>2</sub>排放量在不断的 增加,对全球气候造成的影响越来越严重。国际海 事组织(International Maritime Organization,以下简 称:IMO)研究报告指出 2020年全球航运船舶所排放 的 CO<sub>2</sub>占据全球 CO<sub>2</sub>总排放量 6% 左右,如果不加控 制,全球船舶 CO<sub>2</sub>排放量在 21 世纪中期有可能翻 倍<sup>[1]</sup>。国际海事组织(IMO)海上环境保护委员会 (MEPC)第 72 届会议于 2018年4月9日至13日在伦 敦召开,以第 MEPC.304(72)号决议通过了《IMO 船舶 温室气体减排初步战略》<sup>[2]</sup>。战略提出国际航运碳强 度下降的具体目标:到 2030年,国际航运每单位运输 活动的平均 CO<sub>2</sub>排放量与 2008年相比至少降低 40%, 并力争到 2050年降低 70%<sup>[3]</sup>。由于船舶用脱碳塔能 够有效的减少船舶 CO<sub>2</sub>排放,已成为当今研究的热 点,具有重要经济和社会效益。

目前,国内外常用的CO2捕集方法有吸收法、吸 附法、膜分离法、低温蒸馏法、化学循环燃烧法、水合 物等[4]。江南大学沈鹤鸣等[5]采用氢氧化钙固碳,研 究了CO,浓度和碳化时间对碳化速率以及碳化产物 强度的影响,得出不均匀碳化是导致高CO,浓度下碳 化产物强度较低的主要因素;Du等<sup>[6]</sup>指出不同质量 分数对CO,吸附率的影响顺序为:氢氧化钠>水>羧甲 基淀粉钠。Wang等<sup>[7]</sup>提出了使用碱性 NaOH 溶液来 吸收船舶尾气中CO,的方法,设计出了一套船舶脱碳 系统,研究表明CaO固体颗粒的存在可以提高NaOH 溶液吸收船舶尾气CO2的脱碳效率。Zhang等<sup>[8]</sup>采用 CFX软件对鼓泡塔内 NaOH 溶液吸收 CO,过程进行了 数值模拟,对CO2在水中的物理吸收以及在NaOH溶 液中的化学吸收进行了模拟。Chiang等<sup>[9]</sup>在氢氧化 钠水溶液中加入甘油,很容易使CO,的总吸收效率提 高到90%以上。Park等<sup>[10]</sup>利用CaO的溶液加入 NaOH与KOH吸收CO,的饱和溶液中,以减少矿化固 定二氧化碳形成金属碳酸盐所需的额外能量。Johny 等印研制了一种简单实用的二氧化碳捕集装置,用 喷嘴喷洒 NaOH 吸收 CO,生成 Na,CO,,发现在 NaOH 溶液摩尔浓度为5mol/L时,CO,的吸收速率最大。Tirandazi等<sup>[12]</sup>利用黄原胶,NaOH溶液与CO<sub>2</sub>,采用田口 方法实验考察了温度、液膜厚度、粘度、NaOH浓度等 主要操作参数对CO,脱除率的影响。

从现有的文献分析,碱法脱碳的研究多集中在 碱性试剂吸收 CO<sub>2</sub>的表像及特性,并没有把传热传质 和化学反应过程考虑在内,鲜见有将碱法脱碳应用 于船舶尾气处理方向。基于此,本文以船用6135型 脱碳塔为研究对象,选择高效的化学吸收法,利用工 程软件进行传热传质和化学反应过程的数值计算, 分析脱碳塔内的气液两相流场、组分中CO<sub>2</sub>的浓度场 等,研究烟气进气入口形式、进气入口倾斜角度、喷 嘴喷雾锥角以及喷嘴的布置方式等因素对脱碳塔脱 碳效率的影响,通过数值模拟与实验相结合的方法, 提出脱碳塔脱碳效率的优化方案,为船用脱碳塔的 开发与应用提供理论与实验支撑。

#### 2 方 法

#### 2.1 实验系统与测量方法

2.1.1 实验系统

船用脱碳塔系统工作原理如图1所示。船舶柴 油机按负荷特性运行,含有CO2的柴油机尾气由经烟 气冷却器冷却后,再由鼓风机送至脱碳塔7中;同时 药品循环泵把一定流量的NaOH溶液从贫液柜14中 送到脱碳塔内部的三个雾化喷嘴处;烟气从脱碳塔 底部进气口进入脱碳塔内,向上运动,与雾化喷嘴喷 出的碱性NaOH溶液逆向接触,气液两相在液滴表面 发生强烈气液传质以及化学反应,进而把烟气中的 CO, 脱除; 被脱除 CO, 后的混合气体通过除雾器后, 从 脱碳塔顶部烟气出口排出;吸收CO,气体后的NaOH 溶液从脱碳塔底部出液口通过回流管进入再生池9 中。通过加药漏斗10加入CaO固体颗粒与再生池中 的富液进行反应后产生CaCO<sub>3</sub>沉淀物,然后利用固液 分离装置12进行分离,分离出的固体沉淀物和NaOH 贫液分别进入固体收集柜13和贫液柜14中,实现 NaOH溶液循环利用。

2.1.2 实验设备及药品

试验过程中主要用到的设备:6135G128ZCa型船 用四冲程柴油机、自行设计的6135型船用脱碳塔、 KSD/LQQ/200KW型烟气冷却器、德图 Testo350烟气 分析仪、4-72-3.2A型风机、G30-2型单螺杆泵、德图 Testo425 热敏风速仪和 MP512-02 精密型 PH 计等。 部分实验设备见图 2 所示。

实验过程中用到的药品:船用轻质燃料油、工业级 NaOH粉末和 CaO 固体颗粒。

2.1.3 测量方法

对于气体流量与温度的测量使用的是德图 Testo425 热敏风速仪;对于液体流量的测量使用的是广 州康乐环保科技有限公司生产的 LZS-32 型液体转子 流量计;对于烟气中 CO<sub>2</sub>浓度的测量使用的是 Testo350 烟气分析仪;使用 MP512-02 精密型 PH 计测量



1-6135G128ZCa engine; 2-Exhaust pipe; 3-Bypass-valve; 4-Exhaust export; 5-Cooler; 6-Draught Fan; 7-Decarburization tower; 8nozzle; 9- Regeneration tank; 10- Dosing funnel and cover plate; 11-Settling tank; 12-Separation equipment; 13-Solid collection tank; 14-Poor fluid; 15-Pump; 16-Exhaust analyzer

Fig. 1 Recovery system of ship's CO<sub>2</sub>



(a) 6135 marine diesel engine



(b) 6135 type decarbonization platformFig. 2 Experimental equipment



(c) Testo350 gas analyzer

NaOH溶液的浓度与温度。

#### 2.2 模型描述

2.2.1 物理模型

本文选用的是6135型船用脱碳塔,塔参数如表1 所示。

数值模拟的计算区域为脱碳塔底部到脱碳塔顶 部气体出口之间的全部区域,认为塔底部 NaOH 溶液 对气相流场不会造成影响。为了准确高效地划分网 格以及数值模拟结果的收敛性,将脱碳塔的原型作 了简化,假设塔内NaOH溶液管路附件对脱碳塔内部 气液两相流场没有影响,把喷嘴设置成射流源,脱碳 塔上部的除雾器只除去液体,对脱碳效率与脱碳过 程没有影响。

使用脱碳塔的三维结构物理模型示意图与网格 划分如图3和图4所示。

在进行数值模拟过程总,作了以下基本假设:



 Table 1
 Basic parameters of 6135 decarbonization tower



Fig. 3 Physical model of decarbonization tower



Fig. 4 Mesh

(1) 塔内烟气为不可压缩流动,当作理想气体处理。 (2) 液滴为刚性球体,直径按照 Rosin-Rammber分布。 (3) 因为液滴之间直径相差很小,它们之间的碰撞也 可以忽略<sup>[13]</sup>。因本文所用液滴的韦伯数很小,故忽 略液滴之间的破碎<sup>[14]</sup>。此外,依据参考文献[15],忽 略液滴之间的聚并。(4) 在数值模拟时不考虑因液滴 蒸发、变形与传质时所造成的烟气速度以及液滴曳 力系数的改变。(5) 气液两相和塔壁间的热交换忽略 不计,当液滴碰撞到塔壁之后顺着塔壁面留下,对气 相不再有影响。

在进行三维建模与网格划分时,从多个因素衡量,决定采用非结构化网格对脱碳塔几何模型进行 网格划分。气相以速度入口和压力出口为边界条件,液相以逃逸为边界条件。采用二阶迎风格式作 为守恒方程的离散格式,采用 SIMPLEC 算法计算压 力-速度耦合定常流。

2.2.2 动力学模型

脱碳塔内的流体动力学可以看作是由连续相的 烟气和离散相的液滴组成的两相流,由于离散相液 滴的分散体积率远小于10%,本文采用E-L模型对两 相流的流动和传热特性进行数值模拟。采用拉格朗 日坐标方法对离散相液滴的流动进行模拟,优点是 不仅可以对液滴粒径分布进行建模,而且还能够把 连续相和离散相的耦合结果所产生的影响考虑在 内。对于气相湍流,使用标准 k - ε模型和标准壁函 数,分别求解塔内完全湍流区和近壁湍流区。控制 方程有连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能、耗 散率、浓度守恒方程。这些方程的通用方程可以表 示为<sup>[16-17]</sup>

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v\Phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\Gamma\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial t}\left(\Gamma\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial t}\left(\Gamma\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) + S \quad (1)$$

式中 $\rho$ 为气相密度,kg/m<sup>3</sup>;t为时间,s;u,v,w分别 为气相在x,y,z三个方向上的速度,m/s; $\sigma$ 为通用因 变量; $\Gamma$ 为各方程变量的扩散系数;S为各守恒方程的 源项。 $\phi,\Gamma,S$ 的具体内容如表2所示。

采用颗粒轨道模型(DPM)对塔内液滴的运动进行描述,采用随机漫步模型(Random Walk Model)描述湍流对液滴运动的影响。因液体密度远远大于气体密度,热应力、Saffman升力以及布朗力都忽略不计,只考虑重力与曳力。

对于离散相颗粒轨道的求解是利用颗粒作用力 微分方程积分得到,离子作用力平衡方程为<sup>[18]</sup>

$$\frac{du_{p}}{dt} = F_{D}(u - u_{p}) + \frac{g_{x}(\rho_{p} - \rho)}{\rho_{p}} + F_{x}$$
(2)

右边第一项为颗粒单位质量曳力,第二项为颗粒重力,第三项为颗粒单位质量曳力,第二项为颗粒重力,第三项为其它作用力。u为连续相速度, $m/s;u_p$ 为颗粒相速度, $m/s;\mu$ 为连续相粘度, $Pa \cdot s;\rho$ 为连续相密度, $kg/m^3;\rho_p$ 为颗粒密度, $kg/m^3;d$ 为颗粒直径,m。在考虑气液传质时,用不同守恒方程的源项( $S_m, S_u, S_e, S_{con}$ )来描述气体吸收对连续相的影响。

2.2.3 CO2吸收模型

CO<sub>2</sub>的吸收效率可以表示为<sup>[19]</sup>

$$\frac{\mathrm{d}C_{\mathrm{co}_2}}{\mathrm{d}t} = -N_{\mathrm{co}_2}\alpha\tag{3}$$

式中, $C_{co_2}$ 为液相中CO<sub>2</sub>的摩尔浓度,mol/m<sup>3</sup>;t为 吸收时间,s; $N_{co_2}$ 为CO<sub>2</sub>总传质通量,mol/(m<sup>2</sup>·s); $\alpha$ 为 单位体积中有效气液传质面积,m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>。

NaOH溶液吸收CO<sub>2</sub>的过程为一个典型相际间传 质过程,因为液滴的粒径大小只有几百微米,不考虑 Table 2 Parameters listed in universal equation

Conservative equation	$\Phi$	Г	S					
Mass	1	0	$S_{ m m}$					
Momentum-x	u	$\mu_{ m eff}$ = $\mu$ + $\mu_{ m t}$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}\right) + S_{u}$					
Momentum-y	v	$\mu_{ m eff}$ = $\mu$ + $\mu_{ m t}$	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + S_{\text{v}}$					
Momentum-z	w	$\mu_{\rm eff} = \mu + \mu_{\rm t}$	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + S_{\text{w}}$					
Turbulence kinetic energy	κ	$\mu + \frac{\mu_{\iota}}{\sigma_{\kappa}}$	$G_{\kappa} + \rho \varepsilon$					
Dissipation rate	ε	$\mu + \frac{\mu_{\iota}}{\sigma_{\varepsilon}}$	$\frac{\varepsilon}{\kappa} \left( C_{1\varepsilon} G_{\kappa} - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon \right)$					
Energy	E	$\frac{\mu}{P_{\rm E}} + \frac{\mu_{\rm t}}{\sigma_{\rm E}}$	$S_{e}$					
Concentration	С	$\rho(D + \frac{D_{\rm t}}{\sigma_{\rm c}})$	$S_{ m con}$					

液滴在内部的扩散,因此按照双模理论来建立 CO<sub>2</sub>的 吸收传质理论模型,在气液相界面上总传质通量方 程为

$$N_{\rm co_2} = K_{\rm G} \left( p_{\rm co_2, \rm g} - p_{\rm co_2, \rm i} \right) \tag{4}$$

式中 $K_{c}$ 为气相总传质系数,mol/(m<sup>2</sup>·s·Pa); $p_{co_{2},g}$ 为气相中 $CO_{2}$ 的分压,Pa; $p_{co_{2},i}$ 为气液相界面上 $CO_{2}$ 的平衡分压,Pa。对于快速化学反应, $p_{co_{2},g}$ 远远大于 $p_{co_{2},i}$ ,所以 $p_{co_{2},i}$ 约等于零。气相总传质系数可以表示为

$$\frac{1}{K_{\rm G}} = \frac{1}{k_{\rm G}} + \frac{H_{\rm CO_2}}{\beta k_{\rm L}}$$
(5)

式中 $k_c$ 为气相中 CO<sub>2</sub>的传质系数,mol/(m<sup>2</sup>·s· Pa); $\beta$ 为化学增强因子; $H_{CO_2}$ 为CO<sub>2</sub>亨利常数,Pa·m<sup>3</sup>/ mol; $k_L$ 为液相中CO<sub>2</sub>的传质系数,mol/(m<sup>2</sup>·s·Pa)。 $k_c$ 可根据Frossling方程得出<sup>[20]</sup>

$$Sh = \frac{k_{\rm G}d}{D_{\rm CO_{2,G}}} = 2 + 0.55Re^{0.5}Sc^{0.333}$$
(6)

式中, 
$$Re = d \left| u - u_{p} \right| \rho / \mu$$
;  $Sc = \frac{\mu}{\rho D_{CO_{2}, G}}$ ;  $D_{CO_{2}, G} =$ 

 $\frac{9.86\times10^{^{-9}}T^{^{1.75}}[\frac{1}{M_{_{\rm N_2}}}+\frac{1}{M_{_{\rm CO_2}}}]^{^{0.5}}}{1\times10^{^{-6}}p(V_{_{\rm CO_2}}{}^{^{1/3}}+V_{_{\rm N_2}}{}^{^{1/3}})}; {\rm th} \ {\rm ,} \ Re \ {\rm E} \ {\rm fr} \ {\rm \ddot{x}} \ {\rm y} \ ; \label{eq:eq:energy}$ 

Sh和Sc分别是舍伍德数和传质施密特数; $u \pi u_p$ 分别 为气体和液滴速度, $m/s;\rho \pi \mu$ 分别为气体密度和粘 度, $kg/m^3 \pi Pa \cdot s; D_{CO_2,c} \rightarrow CO_2$ 在气相中的扩散系数,  $m^2/s; M_{N_2} \pi M_{CO_2}$ 分别为 $N_2 \pi CO_2$ 的摩尔质量,g/mol; $V_N, \pi V_{CO_2}$ 分别为 $N_2 \pi CO_2$ 的分子体积, $cm^3/mol_o$  液相传质系数 k<sub>L</sub>可由式(7)确定<sup>[21]</sup>

$$Sh = \frac{k_{\rm L}d}{D_{\rm CO_{2,\rm L}}} = 0.75 Re_{\rm d}^{0.5} Sc^{1/3}$$
(7)

式中 D<sub>CO2</sub>L为液相中 CO2的扩散系数,m/s;可根据利用修正后的 Stokes-Einsteing 方程估算

$$D_{\rm CO_2}^{\rm L} = D_{\rm CO_2}^{\rm H_2O} \left(\frac{\mu_{\rm H_2O}}{\mu_{\rm NaOH}}\right)^{0.8}$$
(8)

$$D_{\rm CO_2}^{\rm H_2O} = 2.35 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-2119}{T_{\rm L}}\right)$$
(9)

式中 $D_{CO_2}^{H_2O}$ 为CO<sub>2</sub>在水中的扩散系数,m/s; $\mu_{H_2O}$ 和  $\mu_{NaOH}$ 分别为水和NaOH溶液的粘度,Pa·s; $T_L$ 为液相 温度,K。

对于低浓度的 NaOH 溶液, NaOH 溶液对亨利常数的影响很小,因此常使用 CO<sub>2</sub>在水中的亨利常数代表 CO<sub>2</sub>在 NaOH 溶液中的亨利常数<sup>[22-23]</sup>

$$H_{\rm CO_2} = 2.8249 \times 10^6 \exp\left(\frac{-2044}{T_{\rm L}}\right)$$
 (10)

虽然 NaOH 溶液与 CO<sub>2</sub>之间会发生复杂的化学反应,有研究发现可以把它们之间的反应当作假一级反应。当反应为假一级反应时( $3 < Ha \leq \beta_1$ ),化学传质增强因子与八田数相等<sup>[24]</sup>

$$\beta = Ha = \frac{\sqrt{k_{\rm ov} D_{\rm CO_2,L}}}{k_{\rm L}} \tag{11}$$

式中 $\beta$ 为瞬时化学传质增强因子;Ha为八田数;  $k_{os}$ 为假一级反应速率<sup>[24]</sup>。

液滴在吸收段的停留时间可以通过索特平均直 径 d<sub>0</sub>的定义和其在流场中的受力情况推算出,进而 可以计算出单位体积有效的气液传质面积α

$$e = \frac{6Q\tau}{Hd_0} \tag{12}$$

式中,d。为液滴索特平均直径,m;Q为塔截面上 喷淋密度,m3/(m2·s)。

0

因此,CO,的吸收速率为

$$\frac{\mathrm{d}C_{\mathrm{co}_2}}{\mathrm{d}t} = -N_{\mathrm{co}_2}\alpha_c = -K_{\mathrm{G}}\alpha p_{\mathrm{co}_2} \tag{13}$$

式中 $K_c\alpha$ 为体积总传质系数,mol·Pa/(m<sup>3</sup>·s)。 因此,质量守恒方程的源项为

$$S_{\rm m} = -N_{\rm CO_2} \alpha M_{\rm CO_2} = -K_{\rm G} \alpha p_{\rm CO_2} M_{\rm CO_2}$$
(14)

组分CO,浓度守恒方程源项为

$$S_{\rm con} = -N_{\rm CO_2} \alpha M_{\rm CO_2} = -K_{\rm G} \alpha p_{\rm CO_2} M_{\rm CO_2}$$
(15)

根据上述传质机理,通过FLUENT18.0软件中的 用户自定义程序(UDF),利用相应的宏定义,编写 CO。吸收模型,加载到FLUENT软件中,完成脱碳塔对 CO,吸收过程的数值模拟。

2.2.4 CO, 脱除效率

吸收效率η在化工实验过程中经常用来表示混 合气体通过塔吸收设备吸收之后的吸收程度,其可 表达成

$$\eta = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \times 100\% \tag{16}$$

在实验过程中测量得到的是CO,体积浓度,也就 是摩尔分数,它们之间的关系为



 $X = \frac{c}{1 - c}$ (17) 因此,CO,的脱除效率可以表达为

$$\eta = \frac{c_1 - c_2}{c_1 (1 - c_2)} \times 100\%$$
(18)

式中 $c_1$ 为脱碳塔进口CO<sub>2</sub>的体积浓度, mol/m<sup>3</sup>;  $c_2$ 为脱碳塔出口CO,的体积浓度,mol/m3。

2.2.5 CO,吸收模型验证

Load

Gas velocity/(m/s)

CO<sub>2</sub> concentration/%

在数学模型中输入实验参数,即:进气方式为水 平切入进入脱碳塔;NaOH溶液浓度、温度、流率分别 为2mol/L,25℃,4m<sup>3</sup>/h;喷嘴设为喷雾锥角为90°的空 心锥喷嘴;柴油机为负荷特性工况,即怠速、25%负 荷、50%负荷、75%负荷、100%负荷;烟气温度冷却到 30℃。脱碳塔内CO,浓度分布云图见图5所示。烟气 从脱碳塔进口进入,在塔内与喷嘴喷射出的雾化液 滴逆流接触,不断地进行气液传质与化学反应,烟气 中的 CO2不断地被 NaOH 溶液吸收,从而使得塔内 CO2浓度逐渐降低。CO2浓度随着塔内高度的增加呈 逐渐减小。

为了验证CO,吸收模型的有效性,开展船舶6135 型脱碳塔脱碳实验,实验条件与数值模拟条件相同, 测得脱碳塔出口CO,浓度如表3所示。

在得到数值模拟和实验脱碳塔出口的CO2浓度

25%

13.8

2.85

50%

16.5

4.58

75%

18.6

6.02

100%

18.9

7.19

Exhaust gas parameters under different loads Table 3

Idling

11.8

Fig. 5 CO<sub>2</sub> concentration on longitudinal sections and horizontal sections under different loads

后,根据式(18)计算出 6135 型脱碳塔的模拟与实验 脱碳效率,如表4所示。

Table 4	CO,	absorption	rate	under	different	loads
---------	-----	------------	------	-------	-----------	-------

Load	Idling	25%	50%	75%	100%	Average		
Absorption rate <sup>1</sup>	31.33%	29.93%	28.42%	26.83%	25.87%	28.48%		
Absorption rate <sup>2</sup>	30.15%	28.66%	27.12%	25.58%	24.73%	27.25%		
Note: 1 means simulation result, 2 means experimental result.								

当柴油机负荷增加时,烟气进气速度增大,这会显著地减少烟气在脱碳塔内的停留时间,从而大大减少CO2气体与NaOH溶液的接触传质和化学反应时间,故脱碳塔的脱碳效率呈现逐渐降低的趋势。船舶柴油机在不同负荷下工作,6135型船舶脱碳塔模拟时的平均脱碳效率为28.48%,实验时的平均脱碳效率为27.25%,实验结果与数值模拟结果基本吻合。平均脱碳效率数值模拟结果比实验结果大1.23%,误差在5%以内,由此可以说明CO2吸收模型具有良好的有效性。模拟值比实验值偏大,其主要原因是数值模拟是在理想的状态下进行的,而真实实验时,喷嘴喷射出的NaOH小液滴没有完全与气体接触,传质效率下降,造成吸收率降低。

#### 3 性能优化

#### 3.1 烟气进入脱碳塔入口形式优化

不同的烟气进气入口形式对脱碳塔的内部流场有 影响,从而影响气液传质的效果,影响脱碳效率。对水 平直入式,见图6(a)所示,与水平切入式,见图6(b)所 示,这两种进气入口形式进行了研究,分别对这两种 烟气进气入口形式的脱碳塔进行数值模拟与实验研 究,其结果见图7所示。



Fig. 6 Exhaust gas inlet form

从图7中数据可以看出,当烟气进气入口形式为 水平直入式时,脱碳塔的脱碳效率平均平均模拟值 为26.31%,平均实验值为25.16%;当烟气进气入口形 式为水平切入式时,脱碳塔的脱碳效率平均模拟值 为28.48%,平均实验值为27.25%。水平切入式的模 拟值比水平直入式大2.17%,实验值大2.09%。

原因是因为当烟气进气方式为切入式进气时, 气体在塔内螺旋上升,有利于塔内气流场较为均匀



Fig. 7 Comparison between simulation results and test results of gas inlet form

分布,从而有利于烟气与液滴充分接触。而当烟气 进气方式为直入式时,大部分气体沿着对面塔壁上 升,塔内流场分布严重不均,气液难以充分混合,影 响气液接触传质效果,因此吸收效率低。由此可见 烟气进气入口形式为水平切入式时,脱碳塔的脱碳 效率高。

随着柴油机负荷的增加,不管烟气进气入口形 式是水平直入式还是水平切入式,6135型脱碳塔的 脱碳效率都逐渐降低。但是在相同负荷下,水平切 入式的脱碳效率大于水平直入式的脱碳效率。

#### 3.2 烟气进气入口倾斜角度优化

有研究发现<sup>[25]</sup>,当烟气进气入口向下倾斜一定 的角度,可以有效地减少气体贴壁流动,并改善气体 在塔内分布不均匀的现象,从而提高脱碳塔的吸收 效果。分别通过数值模拟和实验的方法研究了烟气 切向进气入口倾斜角度对脱碳塔脱碳效率的影响。 其它实验条件不变,柴油机在怠速下,分别对切向入 口向下倾斜0°,5°,10°,15°,20°的脱碳塔进行研究, 其模拟与实验结果对比,见图8所示。

由图 8 可知,当烟气进气入口从水平(0°)切向入口增大到烟气进气入口倾斜角度为15°时,脱碳塔的



Fig. 8 Comparison between simulation results and test results of inclined inlet angle

脱碳效率在逐渐的增大,实验值脱碳效率从30.15% 增大到 31.17%。而当烟气进气入口倾斜角度从 15° 增大到 20°时, 脱碳塔的脱碳效率下降到了 30.94%。 实验结果与模拟结果变化趋势一致。当烟气进气入 口倾斜角度为20°时,脱碳效率的模拟值为32.48%, 进一步模拟了当烟气进气入口倾斜角度进一步增大 为25°时,脱碳效率为31.86%,可见脱碳效率呈持续 降低趋势。因此,当烟气进气入口倾斜角度为15° 时,是脱碳塔入口优化的最佳入口倾斜角度,此时脱 碳塔具有较高的脱碳效率,模拟值为32.79%,实验值 为31.17%。原因是当烟气进气入口向下倾斜时有利 于烟气流动的均匀,降低了塔入口区的阻力,更利于 气液传质,从而提高了脱碳效率。但是当烟气进气 入口倾斜角度过大时,如20°及以上时,烟气在表面 张力的作用下,集中在上壁面,使得下部分烟气十分 稀疏,造成烟气脱碳效率反而降低,故入口倾斜角度 不宜过大。

#### 3.3 喷嘴喷雾锥角优化

喷嘴喷雾锥角会影响喷淋液的覆盖角度和覆盖 面积,从而会对脱碳塔的脱碳效率造成影响,故对喷 嘴喷雾锥角大小进行优化。为了研究喷雾锥角对脱 碳塔脱碳效率的影响,分别选取60°,90°,120°这三种 喷雾锥角的实心锥喷嘴,烟气选为切向进气入口并 向下倾斜15°,对脱碳塔的脱碳效率进行数值模拟与 实验,柴油机在怠速下运转,其它条件不变。脱碳塔 的脱碳效率见图9所示。



Fig. 9 Comparison between simulation results and test results of nozzle cone angle

由图 9 可知,实验发现:当喷嘴喷雾锥角大小从 60°增大到 90°时,脱碳塔的脱碳效率也随之增大,脱 碳效率从 28.45% 增大到 31.17%。而当喷嘴喷雾锥 角从 90°增大到 120°时,脱碳塔的脱碳效率却在降 低,脱碳效率从 31.17%降低到了 29.02%。主要是因 为喷雾锥角较小时,喷嘴喷射出的液滴群覆盖面积 小于脱碳塔的截面,一部分烟气绕过液滴贴近壁面 溜走了,未能与液滴充分接触进行传质和化学反应, 从而导致总体的烟气中CO<sub>2</sub>浓度偏高,脱碳效率低。 当喷嘴喷雾锥角过大时,喷嘴喷射出的液滴群覆盖面 积大于脱碳塔的截面,一部分液滴直接喷射到壁面上 顺着壁面留下来,这部分液滴未能充分利用,这也会 影响脱碳效率。实验结果与数值模拟结果变化趋势 一致。由此可见,脱碳塔的最佳喷嘴喷雾锥角大小为 90°为宜,此时,模拟值为32.79%,实验值为31.17%。

#### 3.4 喷嘴的布置方式优化

有研究发现<sup>[26]</sup>,当位于最上部的那个喷嘴的喷 射方向调为向上喷射,并且所在的位置高度不低于 中部向下喷射的喷嘴时,能够提高脱碳塔的吸收效 果。本研究将最上部的喷嘴重新布置为向上喷射, 高度与中部喷嘴位于同一水平面,其数值模拟与实 验结果见图 10所示。



Fig. 10 Comparison between simulation results and test results of nozzle arrangement

由图 10可知,喷嘴布置方式改变后,脱碳塔的脱碳效率都比未优化前有所提高,数值模拟值比实验 值稍微大一些,但变化趋势一致。实验测得脱碳塔 的脱碳效率从 30.15% 提高到了 30.49%;当柴油机在 25% 负荷运行时,脱碳效率从 28.66% 提高到了 29.01%;当柴油机在 50% 负荷运行时,脱碳效率从 27.12% 提高到了 27.56%;当柴油机在 75% 负荷运行 时,脱碳效率从 25.58% 提高到了 26.10%;当柴油机 在 100% 负荷运行时,脱碳效率从 24.73% 提高到了 25.02%。结果表明:对最上部的喷嘴重新布置为向 上喷射,高度与中部喷嘴位于同一水平面时,脱碳塔 的脱碳效率会有所提高。其原因是当最上部的喷嘴 中的吸收液同向接触,因为是同向运行,所以气液接触时间更长。此外,上部喷嘴喷射出的吸收液在下落的过程中也能够与烟气逆向接触,进行强化气液 传质,相对传质时间延长,提高了船用脱碳塔的脱碳 效率。

#### 3.5 优化前后脱碳塔脱碳效率对比

优化前的脱碳塔的进气方式为水平直入式进 气,喷嘴布置方式为常规布置。优化后的脱碳塔的 进气入口形式改为切入式进气、入口向下倾斜角度 15°,喷嘴喷雾锥角大小为90°,且把最上部的喷嘴布 置为向上喷射,高度与中部喷嘴位于同一水平面。 其数值模拟结果与实验结果见图11所示。



Fig. 11 Comparison of decarburization efficiency before and after decarburization tower optimization

从图 11 可以看出, 脱碳塔的脱碳效率数值模拟 值提高了 4.64%, 实验值提高了 4.42%。

#### 4 结 论

本文对船舶 6135 型脱碳塔性能进行了优化研 究,可以得到以下一些结论:

(1)当烟气进口形式从水平进入优化成垂直进 入后,烟气能够在脱碳塔内形成环形流动,有利于气 液接触;且进气向下倾斜15°时,脱碳效率最优,达到 31.17%。

(2)喷嘴喷雾锥角大小为90°且最上面的喷嘴向 上喷射,能够有效地增加气液传质效率,继而提高脱 碳效率。

(3)优化后的脱碳效率能够提高4.42%左右,可为今后船用脱碳塔的设计及性能优化提供参考。致 谢:感谢上海市科委基金的资助。

#### 参考文献

[1] Nishatabbas R, John C, Tristan S. The Implementation

of Technical Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emission Reduction Measures in Shipping [J]. Ocean Engineering, 2017, 139: 184-197.

- [2] Marine Environment Protection Committee (MEPC), 72th session, 2008. Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships[S].
- [3] 胡 琼,周伟新,刁 峰. IMO船舶温室气体减排初 步战略解读[J].中国造船,2019,60(1):195-201.
- [4] Alonso-Farinas B, Arenas L F V, Navarrete B. Carbon Capture and Utilization Technologies: A Literature Review and Recent Advances [J]. Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects, 2019, 41 (12): 1403-1433.
- [5] 沈鹤鸣, 吴灿彬, 李志华, 等. 氢氧化钙的固碳功能 性研究-CO<sub>2</sub>浓度与碳化时间的影响[J]. 功能材料, 2020, 51(1): 1115-1119.
- [6] Du Y, Gai W M, Jin L Z. A Novel and Green CO<sub>2</sub> Adsorbent Developed with High Adsorption Properties in a Coal Mine Refuge Chamber [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 216-229.
- [7] Wang Z C, Liu X Y, Zhou P L, et al. Impacts of CaO Solid Particles in Carbon Dioxide Absorption Process from Ship Emission with NaOH Solution [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 23(2): 320-326.
- [8] Zhang D, Deen N G, Kuipers J A M. Euler-Euler Modeling of Flow, Mass Transfer, and Chemical Reaction in a Bubble Column[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 48(1): 47-57.
- [9] Chiang C Y, Lee D W, Liu H S. Carbon Dioxide Capture by Sodium Hydroxide-Glycerol Aqueous Solution in a Rotating Packed Bed[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, 72: 29-36.
- [10] Park S W, Song K, Jo H. Laboratory-Scale Experiment on a Novel Mineralization-Based Method of CO<sub>2</sub> Capture Using Alkaline Solution [J]. Energy, 2017, 124: 589-598.
- [11] Johny N, Murali T R, Mathew P S M, et al. Experiment on Carbon Dioxide Removal from Flue Gas[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 11(3): 1094-1101.
- [12] Tirandazi B, Yahyaee A, Kianpour M, et al. Experimental Investigation and Modeling of Viscosity Effect on Carbon Dioxide Absorption Using Sodium Hydroxide [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5 (3): 2597-2604.
- [13] 祝 杰,吴振元,叶世超,等.喷淋塔内液滴运动及 分布特性研究[J].化工与医药工程,2014,35(2): 11-15.
- [14] 冯志鹏. 气流中液滴破碎特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [15] 于水波.湍流液一液分散体系中液滴聚并过程的研究

[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

- [16] 余国琮. 化工计算传质学导论[M]. 天津: 天津大学 出版社, 2011.
- [17] Chen Z, Wang H M, Zhuo J K, et al. Experimental and Numerical Study on Effects of Deflectors on Flow Field Distribution and Desulfurization Efficiency in Spray Towers [J]. Fuel Processing Technology, 2017, 162: 1-12.
- [18] 彭 涛. 氨法烟气脱硫喷淋塔流场数值模拟与试验研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4): 1399-1405.
- [19] 何书申,赵兵涛,俞致远.基于胺法的旋流喷淋气液吸收烟气 CO<sub>2</sub>的性能[J].上海理工大学学报,2016, 38(1):25-30.
- [20] Dong X, Liu Z J, Liu F X, et al. Effect of Liquid Phase Rheology and Gas-Liquid Interface Property on Mass Transfer Characteristics in Bubble Columns[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 142: 25-33.

- [21] 克劳福德.空气污染控制理论[M].北京:冶金工业 出版社,1985.
- [22] Koteswara R P, Hallvard F S, Hanna K K. CO<sub>2</sub> Absorption into Loaded Aqueous MEA Solutions: Impact of Different Model Parameter Correlations and Thermodynamic Models on the Absorption Rate Model Predictions [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 327: 868-880.
- [23] Li Y, Chen X, Huang W J, et al. Below the Room Temperature Measurements of CO<sub>2</sub> Solubilities in Six Physical Absorbents [J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2018, 122: 133-141.
- [24] 曾 庆. 氨法吸收二氧化碳的实验研究[D]. 北京:清 华大学, 2011.
- [25] 王春波,白彦飞.填料塔内喷淋氨水同时脱碳脱硫实 验研究[J].动力工程学报,2015,35(4):298-305.
- [26] 李雪琴. 一种吸附回收高含硫量烟气 CO<sub>2</sub>的装置[P]. 中国专利: 108079767, 2017-12-27.

(编辑:梅 瑛)