

# 船舶主机 SCR 脱硝 CFD 流场模拟及设计优化

张成健<sup>1,2</sup>, 余鸿敏<sup>1,2</sup>, 赵 健<sup>1</sup>, 何静颖<sup>1</sup>, 吴卫红<sup>1,3</sup>, 刘少俊<sup>3</sup>

(1. 浙江大学能源工程设计研究院有限公司 大气所, 浙江 杭州 310027;

2. 蓝天环保设备工程股份有限公司 研发中心, 浙江 杭州 310012;

3. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**基于某船舶主机 SCR 脱硝系统采用 CFD 方法进行流场模拟研究及结构优化设计。首先,通过在烟道和反应器内设置导流板和气流分布板,优化系统结构。其次,分别研究了液滴雾化平均粒径  $D$  和喷射角度  $\alpha$  对催化剂入口氨浓度的影响,结果表明:液滴平均粒径越小和喷射角度越大,液滴的停留时间越短。最后,研究了静态混合器对氨浓度分布的影响,结果显示:静态混合器能够显著提高氨与烟气的混合效率,平均值为 60.2%。

**关键词:**船舶;SCR 脱硝;流场;数值模拟;设计优化

**中图分类号:**U664.121

**文献标志码:**A

**文章编号:**2097-0358(2022)2-0015-11

## 0 引言

大型船舶主机产生的大量氮氧化物会对大气造成严重污染,并严重威胁到海洋生态环境<sup>[1]</sup>。据统计,船用主机的  $\text{NO}_x$  排放量占世界  $\text{NO}_x$  总排放量的 15% 左右<sup>[2]</sup>。我国船舶排放的氮氧化物占世界船舶总排放量的 14.25%,在全国  $\text{NO}_x$  排放总量的占比高达 10.6%。<sup>[3]</sup>国际海事组织颁布了 MARPOL (Marine Agreement Regarding Oil Pollution Of Liability, 国际防止船舶造成污染公约) 公约的附则 VI 《防止船舶造成空气污染规则》,在指定的氮氧化物排放控制区实行 Tier III 排放标准<sup>[4]</sup>。而我国发布的《船舶大气污染物排放控制区实施方案》规定,2022 年后我国排放控制区域内的船舶排放标准也将按照 Tier III 排放标准实行<sup>[5]</sup>。

选择性催化还原 (Selective Catalytic Reduction, SCR) 脱硝技术因无须改动发动机结构,脱硝效率高,适应船舶种类广,是目前主流的船舶脱硝技术。SCR 脱硝技术是利用尿素等还原剂,在催化剂的作用下,将柴油机烟气中的氮氧化物还原成氮气<sup>[6]</sup>。流场均匀性是保证 SCR 脱硝的关键技术指标之一,较多专家学者对柴油机 SCR 脱硝流场进行了研究。王铮等用数值模拟方法研究船舶柴油机 SCR 脱硝过程中,喷射管中尿素分解产生氨气及其分布均匀性问题。<sup>[7]</sup>陈冯等采用数值模拟研究了不同工况下柴油机排气速度和温度对尿素液滴的分布及均匀性影响。<sup>[8]</sup>王谦等对脱硝系统进行模拟,研究了 SCR 系统流场及尿素液滴和组分浓度的分布规律。<sup>[9]</sup>温苗苗等采用计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法对柴油机 SCR 系统进行研究。<sup>[10-11]</sup>其他专家学者也采用数值或实验等方法对柴油机脱硝系统进行了不同研究。<sup>[12-16]</sup>以上研究主要基于陆用柴油机,而船舶柴油机烟气量大、管道直径大,氨与烟气混合难度大,因此有必要进行更深入的研究。

## 1 船舶 SCR 脱硝概述

### 1.1 船舶 SCR 脱硝简介

船舶 SCR 脱硝系统是利用适量的尿素溶液作为还原剂,雾化后喷射到船舶烟道中,利用烟气的热量将尿素分解为氨气。氨气与柴油机烟气中的  $\text{NO}_x$  在到达反应器催化剂层前均匀混合,在反应器中经过催化剂的选择性催化还原,将  $\text{NO}_x$  还原为  $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,从而减少氮氧化物排放。

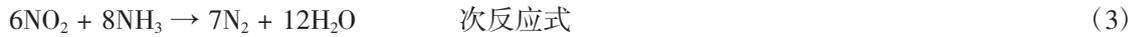
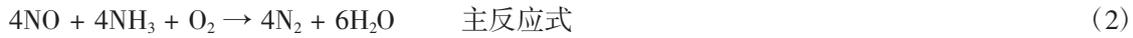
其中,尿素分解的反应式如下:



由于烟气  $\text{NO}_x$  中  $\text{NO}$  含量高, $\text{NO}_2$  含量低,因此,SCR 脱硝还原化学反应式如下:

收稿日期:2022-03-14

作者简介:张成健(1985—),男,山东安丘人,浙江大学能源工程设计研究院有限公司大气所、蓝天环保设备工程股份有限公司研发中心工程师,硕士。



SCR 脱硝系统一般包含喷射与混合装置、反应器及催化剂模块、吹灰系统、伴热系统、控制装置、尿素溶液制备存储装置等装备。

## 1.2 船舶 SCR 脱硝计算方法

对于 SCR 脱硝系统,评定其系统截面流场分布均匀性采用相对标准偏差系数  $C_v$  表示, $C_v$  值越小表示该截面测量值分布越均匀。

其计算方法如下:

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

$x_i$ —测点测量值;

$\bar{x}$ —测点平均值;

$n$ —测点数量。

## 2 CFD 模拟方法

### 2.1 计算简化与假设

- (1) 由于烟气流速小于 30 m/s,因此假设烟气为不可压缩气体;
- (2) 不考虑壁面散热;
- (3) 假设主机出口截面气流均匀,即模型入口以均匀流速计算;
- (4) 不考虑导流板、气流分布板的壁厚,模拟时以面代替;
- (5) 催化剂以多孔介质方式模拟,给定一个与实际相当的阻力值。
- (6) 假设液滴为球形,且直径服从 Rosin-Rammler 分布;
- (7) 流场计算中不考虑液滴间的碰撞、破碎及聚并。

### 2.2 三维建模

依据设计图纸,结合数值模拟计算的合理性,进行 1:1 三维建模,模型范围从柴油机烟气出口到脱硝出口烟道,包括了反应器入口烟道、反应器、反应器出口烟道、导流板、静态混合器、气流分布板和整流格栅等结构。三维模型如图 1 所示。

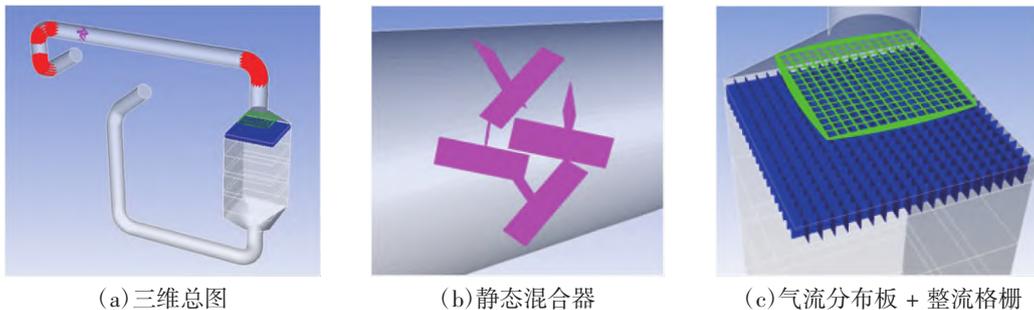


图 1 CFD 三维建模

### 2.3 网格剖分

采用商业 CFD 前处理软件对三维模型进行网格剖分,网格采用六面体网格与四面体网格相结合的方式,对导流板、静态混合器和气流分布板等尺寸较小的区域采用四面体网格进行加密,整流格栅采用六面体网格加密,并对整个模型网格进行网格无关性计算,在保证网格数量大于 240 万以后,模型首层催化剂入口速度  $C_v$  值基本都在 6.4% 左右,计算误差已远小于 0.5%,如图 2 所示。因此,本文计算模型网格数量都大于

240 万, 三维模型网格剖分图如图 3 所示。

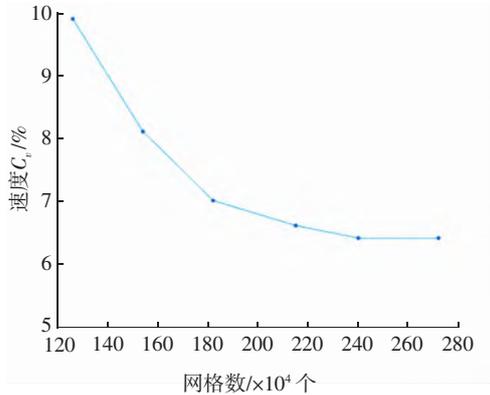


图 2 网格数量与首层催化剂入口速度  $C_v$  值的关系图

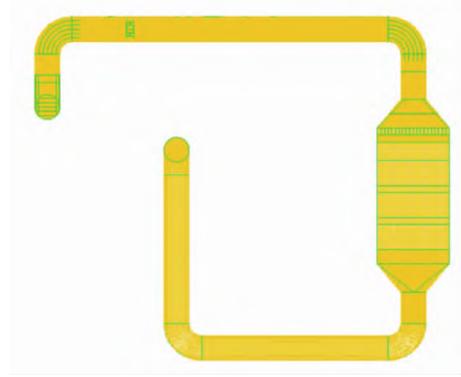


图 3 网格剖分图

#### 2.4 控制方程

根据上述假设, 对于黏性不可压缩流体流动的动量方程为 N-S 方程, 其方程可表示为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (5)$$

式中:

$\phi$ 、 $\Gamma$ 、 $S$  分别为通用变量、广义扩散系数和广义源项。

等式两边各项依次为瞬态项(Transient Term)、对流项(Convective Term)、扩散项(Diffusive Term)和源项(Source Term)。

对于流场计算, 根据雷诺数大小, 一般都是湍流。将 N-S 方程写成雷诺时均方程形式时, 由于雷诺应力项的存在使方程组不能闭合, 因此引入湍流模型进行封闭, 最常用的湍流模型为标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  方程<sup>[13]</sup>。由于该方程计算经济、适应范围广、计算结果合理, 因此得到广泛应用。其中:

湍流  $\kappa$  方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

耗散率  $\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (7)$$

其中:  $\mu_t$  为湍流黏性系数,  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 。

上述方程式中,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_\mu$  为常数,  $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ;  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.33$ , 分别为  $k$  和  $\varepsilon$  的湍流普朗特数;  $S_k$  和  $S_\varepsilon$  是用户自定义源项;  $G_b$  是由于浮力引起的湍动能项;  $Y_M$  为湍流脉动扩张项;  $G_k$  为平均速度梯度引起的应力源项。

采用随机颗粒轨道模型(DPM)对离散相进行追踪, DPM 模型通过积分 Lagrangian 参考系下的离散相颗粒的运动方程计算其运动轨迹。由于颗粒的惯性与受力平衡, 离散相颗粒运动方程为(以直角坐标系内  $x$  方向为例)

$$\frac{du_p}{dt} = f_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + f_x \quad (8)$$

式中:

$f_x$ —附加加速度项;

$\frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ —单位颗粒质量的重力与浮力的合力;

$f_D(u - u_p)$ —单位颗粒质量受到的阻力;

$u$ —连续相速度;

$u_p$ —颗粒相速度;

$\rho$ —连续相密度;

$\rho_p$ —颗粒相密度。

对于雾化后,液相还原剂尿素液滴在烟气中的蒸发由浓度梯度扩散规律控制,蒸发速率  $N_i$  计算公式为:

$$N_i = k_c(C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (9)$$

式中:

$k_c$ —传质系数, m/s;

$C_{i,s}$ —液滴表面蒸气  $i$  的浓度, kmol/m<sup>3</sup>;

$C_{i,\infty}$ —当地气相蒸气  $i$  的浓度, kmol/m<sup>3</sup>。

其中,传质系数  $k_c$  由 Sherwood 关联式计算,如下:

$$Sh_{AB} = \frac{k_c d_p}{D_{i,m}} = 2.0 + 0.6Re_d^{1/2} Sc^{1/3} \quad (10)$$

式中:

$D_{i,m}$ —组分  $i$  蒸气在连续相中的扩散系数, m<sup>2</sup>/s;

$S_c$ —为施密特数。

尿素热解反应速率  $k$  描述采用 Arrhenius 定理:

$$k = A \left( \frac{T}{T_0} \right)^n \exp\left(-\frac{E}{R_u T}\right) \quad (11)$$

式中:

$A$ —之前因子;

$T$ —热力学温度, K;

$E$ —表观活化能, J/kmol;

$R_u$ —摩尔气体常量, J/(kmol·K)。

对于 SCR 系统反应器内的烟气经过催化剂层的压降,通过将催化剂层看作多孔介质进行模拟。其压降损失模拟公式见下式:

$$S_i = \frac{\mu}{\sigma} v_i + C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho |v_i| v_i \quad (12)$$

式中:

$S_i$ — $i$  方向上动量源项, Pa/m;

$\mu$ —层流黏度, Pa·s;

$\sigma$ —介质渗透性;

$v_i$ — $i$  向速度分量, m/s;

$\rho$ —密度, kg/m<sup>3</sup>;

$C_2$ —内部阻力因子, 1/m。

## 2.5 边界条件与求解方法

模拟计算根据实际烟气参数及尿素溶液参数进行设置,如表 1 所示。计算入口采用速度入口,出口边界条件采用压力出口,离散相颗粒以不同喷枪参数设置,壁面采用无滑移壁面。压力速度耦合采用 SIMPLE 算

法, 离散项采用一阶迎风格式。收敛条件除能量方程残差采用  $10^{-6}$ , 其他方程残差都采用  $10^{-3}$  作为收敛条件进行定长计算。

表 1 烟气参数及尿素溶液参数

项目	数值
功率/kw	9 960
转速/rpm	127
排气压力/MPa	0.23
入口烟气速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	27.4
烟气质量流量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	23.9
烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	456
$\text{NO}_x$ 浓度/( $\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ )	13
$\text{NO}_2/\text{NO}_y/\%$	5
$\text{SO}_x$ 浓度/ppm	600
$\text{SO}_3$ 浓度/ppm	50
尿素溶液浓度/%	40
尿素溶液温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
液滴喷入速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	35

### 3 结果分析

#### 3.1 烟道结构优化设计分析

从图 4(a) 可以看出, 在优化前的设计方案中, 船舶柴油机出口烟道有 2 个  $90^{\circ}$  弯头, 由于弯头的离心作用, 导致烟气流经弯头处时偏离烟道中心, 尤其在流经尿素喷枪上游弯头时, 高速气流处于烟道上部, 当尿素喷枪在烟道中心位置将尿素溶液喷入烟道时, 尿素溶液不能与烟气在管道径向方向上相匹配, 因此需要优化该位置流场。同样, 在反应器入口烟道存在一  $90^{\circ}$  弯头, 同时反应器上部为一较短的圆变方的扩张段, 烟气进入反应器后不能有效扩散, 高速气流集中在反应器中心位置, 四周气流流速较低, 致使首层催化剂入口烟气流速不均匀, 如图 4(c) 所示, 因此需要优化反应器入口流场。

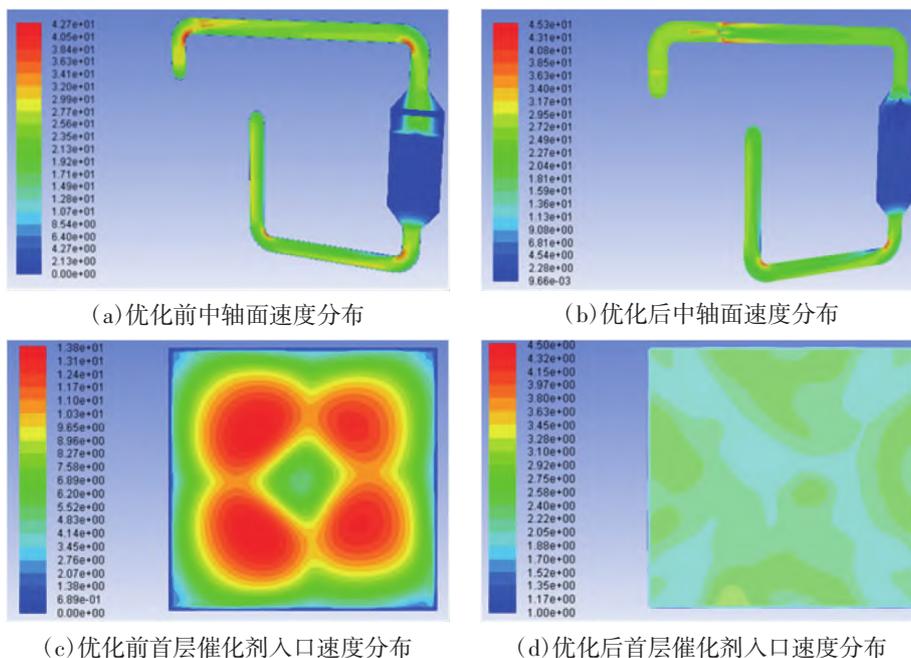


图 4 优化前后截面速度分布图

首先,通过在尿素喷枪上游2个弯头处设置同心圆导流板组,各个弯头下游速度场趋于均匀,喷枪上游速度 $C_v$ 值由优化前的45.6%降低到优化后的9.6%,满足喷枪喷射速度场均匀度要求。然后,在脱硝反应器上游弯头设置同样型式导流板组,保证烟气速度在反应器入口段均匀,为反应器内烟气速度均布打好基础。最后,在反应器扩张段中间位置设置一开孔率为50%的气流分布板,通过气流分布板的均布作用,使烟气在扩张段内充分发展,经过整流格栅的整流作用后,到达首层催化剂入口的烟气速度 $C_v$ 值由优化前的47.9%降低为优化后的6.0%,优化效果明显。

### 3.2 尿素液滴粒径影响分析

尿素溶液作为还原剂需要经过双流体喷枪喷射雾化成液滴颗粒后进入烟道,液滴颗粒在高温烟气作用下分解成 $\text{NH}_3$ 才能与烟气中的 $\text{NO}_x$ 进行混合,因此在烟气温度、流速已定的情况下,雾化液滴颗粒粒径( $D$ )的大小会影响液滴吸热分解的时间及其运动过程,鉴于此,需要研究合适的雾化液滴粒径尺寸。

根据常用喷枪雾化粒径,本文选择喷射角度为 $120^\circ$ ,平均粒径为 $15\ \mu\text{m}\sim 205\ \mu\text{m}$ ,平均粒径大小间隔 $10\ \mu\text{m}$ 共20种雾化粒径尺寸进行模拟计算,获得反应器内催化剂入口截面氨浓度的 $C_v$ 值进行对比分析,计算模拟结果如图5所示。从图中可以看出,整条曲线成近似“U”型分布,当雾化液滴粒径小于约 $60\ \mu\text{m}$ 时,催化剂入口截面氨浓度 $C_v$ 值大于5%,不满足设计要求( $C_v \leq 5\%$ );当雾化液滴粒径大于约 $130\ \mu\text{m}$ 时,催化剂入口截面氨浓度分布同样不达标,而且随着液滴粒径增大,浓度 $C_v$ 值急速增大;只有当液滴粒径在 $60\ \mu\text{m}\sim 130\ \mu\text{m}$ 之间时,催化剂入口氨浓度 $C_v$ 值满足设计要求,且液滴平均粒径为 $105\ \mu\text{m}$ 时,氨浓度 $C_v$ 值最小,为1.61%。

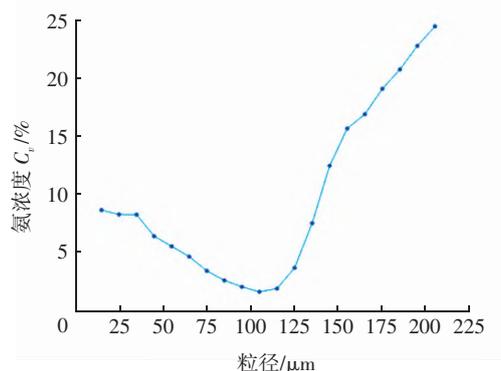


图5 尿素液滴粒径大小对浓度分布的影响

图6为不同雾化粒径情况下,尿素液滴颗粒在烟道内的迹线。从图中可以看出,当平均粒径 $D = 25\ \mu\text{m}$ 时,由于粒径较小,受热后比较容易蒸发分解,其最大停留时间仅为 $0.21\ \text{s}$ ,并且由于雾化粒径小,液滴质量小,导致其惯性力不足,在一定喷射角度下,烟道轴向方向穿透力较差,致使雾化后的颗粒基本都处于烟道中心位置,分解后产生的氨气不能有效扩散至整个烟道截面,造成催化剂入口位置中间氨浓度较高,四周氨浓度低,因此氨气浓度分布不均匀,氨浓度 $C_v$ 值较大,如图7(a)所示。当平均粒径 $D = 105\ \mu\text{m}$ 时,液滴最大停留时间约为 $0.29\ \text{s}$ ,在水平烟道内完全受热分解,且由于其粒径大小适中,惯性力合适,能够有效在烟道轴向截面范围内充分运动发展,分解后的氨气能均匀分布于烟道内,所以首层催化剂入口氨浓度 $C_v$ 值最小,如图7(b)所示。当平均粒径 $D = 155\ \mu\text{m}$ 时,因雾化粒径大,吸热后不能完全蒸发分解,其最大的颗粒停留时间超过 $0.5\ \text{s}$ ,部分液滴颗粒在到达反应器内才能分解,因此导致催化剂入口氨浓度呈现中间浓度高,四周低的极不均匀状态,如图7(c)所示。

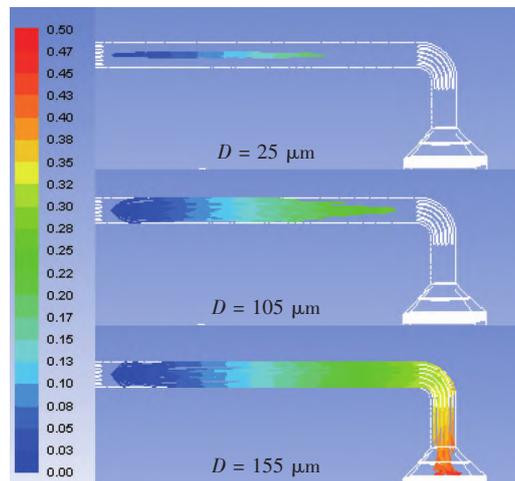
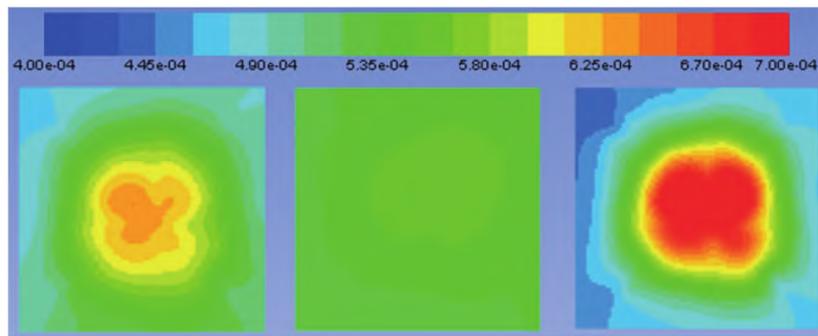


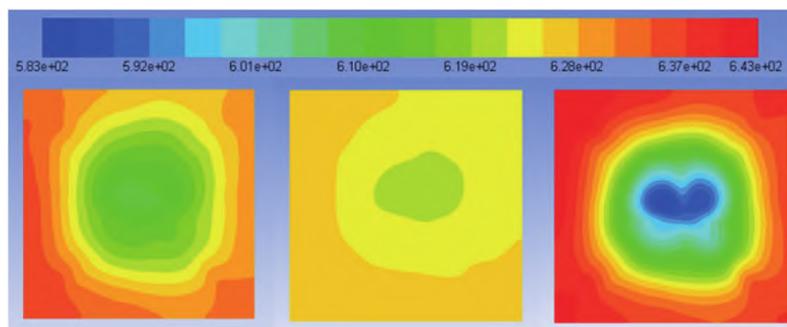
图 6 不同粒径下颗粒轨迹停留时间



(a)  $D = 25 \mu\text{m}$  ( $C_v = 8.18\%$ ); (b)  $D = 105 \mu\text{m}$  ( $C_v = 1.61\%$ ); (c)  $D = 155 \mu\text{m}$  ( $C_v = 15.49\%$ )

图 7 不同粒径时催化剂入口截面氨浓度分布云图

液滴粒径的大小对催化剂入口截面温度的影响如图 8 所示。从图中可以看出, 较小液滴平均粒径  $D = 25 \mu\text{m}$  时, 由于液滴集中在烟气中心位置蒸发分解, 因此, 催化剂入口截面烟气中心温度低, 四周温度较高, 截面温差约  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 当平均粒径  $D = 105 \mu\text{m}$  时, 尿素液滴与烟气混合均匀, 液滴蒸发分解后, 首层催化剂入口温差约为  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ , 满足设计要求 (温差  $\leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 而当粒径继续增大, 处于中心位置的被其他液滴“保护”较大的液滴不能快速蒸发分解, 一直到催化剂入口截面之前, 才能完全蒸发分解, 导致中心温度较低, 与周围高温烟气的温差达到约  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , 大大超出了设计要求, 不能保证催化剂的高效催化。



(a)  $D = 25 \mu\text{m}$ ; (b)  $D = 105 \mu\text{m}$ ; (c)  $D = 155 \mu\text{m}$

图 8 不同粒径时催化剂入口截面温度分布云图

### 3.3 喷射角度影响分析

尿素溶液喷射过程中, 喷射角度对于尿素液滴颗粒的分解及其运动也很重要, 合适的喷射粒径对应所

需的喷射角度( $\alpha$ )才能使尿素溶液雾化后,与烟气流速及管道直径相匹配,保证雾化液滴充分吸收热量,分解后形成的氨气,与烟气混合均匀。本文分别研究了液滴粒径  $D = 75 \mu\text{m}$  和  $D = 105 \mu\text{m}$ ,喷射角度分别为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $150^\circ$  时,尿素溶液雾化过程及分解后形成的氨在催化剂入口的分布情况。

从图 9 可以看出,液滴粒径  $D = 105 \mu\text{m}$  时,当喷射角度  $\alpha$  大于  $60^\circ$  时,催化剂入口截面氨浓度  $C_v$  值小于 5%,当喷射角度  $\alpha = 120^\circ$  时,氨浓度  $C_v$  值最小,催化剂入口氨浓度分布最均匀。当液滴粒径  $D = 75 \mu\text{m}$  时,当  $\alpha < 90^\circ$  时,由于液滴粒径相对略小,质量轻,惯性力小,管道轴向运动发展不充分,液滴集中在烟道中心位置,因此催化剂入口氨浓度  $C_v > 5\%$ ,氨浓度分布不均匀;当  $\alpha = 120^\circ$  时,氨浓度  $C_v$  值达到最小,氨分布最均匀。当喷射角度  $\alpha = 150^\circ$  时,两种粒径情况下,更大的角度使尿素雾化后液滴更容易喷射到壁面,不利于分解后氨与烟气混合。

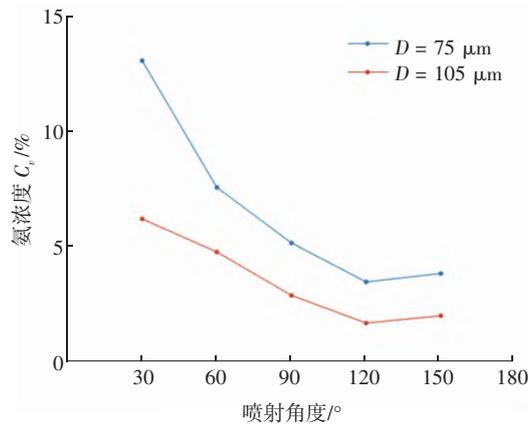


图 9 喷射角度对氨浓度分布影响

图 10 为液滴平均粒径  $D = 105 \mu\text{m}$ ,喷射角度  $\alpha$  分别为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $150^\circ$  时颗粒停留时间。从图中可以看出,随着角度的增大,停留时间逐渐减小。当喷射角度较小时,液滴主要集中在烟道中间,液滴与烟气之间不能充分换热,尤其是被包裹于中心位置液滴颗粒,当外围颗粒吸热蒸发分解后,中心颗粒才慢慢蒸发分解,当  $\alpha = 30^\circ$  时,颗粒的最大停留时间达到 0.38 s;随着喷射角度逐渐增大,雾化颗粒与烟气混合更加均匀,便于液滴的吸热分解;当  $\alpha = 120^\circ$  和  $\alpha = 150^\circ$  时,两者停留时间基本一致,约为 0.20 s。

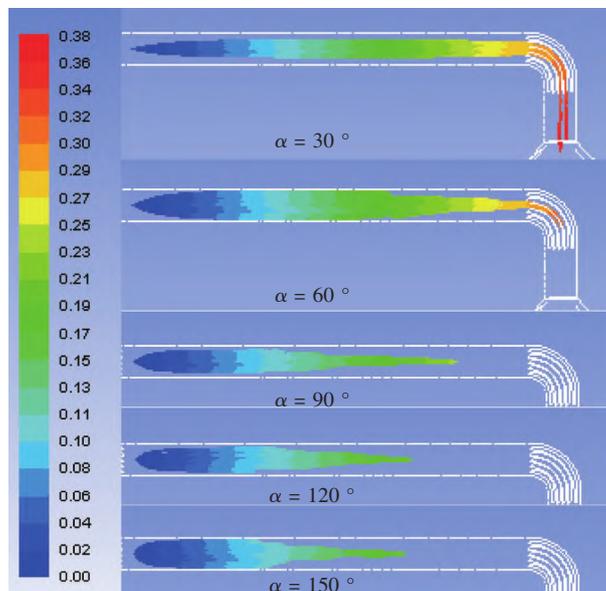


图 10  $D = 105 \mu\text{m}$  时不同喷射角度颗粒停留时间

图 11 为液滴平均粒径  $D = 75 \mu\text{m}$  和  $D = 105 \mu\text{m}$ , 不同喷射角度时雾化液滴的停留时间图。从图中可以看出, 当喷射角度  $\alpha < 120^\circ$  时, 两种粒径停留时间都随着喷射角度增大, 停留时间急剧减小, 且相同喷射角度时,  $D = 105 \mu\text{m}$  液滴停留时间要大于  $D = 75 \mu\text{m}$  液滴停留时间, 两者停留时间差随着角度增大逐渐减小, 主要是因为较小喷射角度时, 液滴主要集中在烟道中心位置, 液滴与烟气接触不充分, 较大的液滴蒸发分解需要更多的热量, 因此  $D = 105 \mu\text{m}$  时, 液滴停留时间更长; 当  $\alpha = 120^\circ$  和  $\alpha = 150^\circ$  时, 两种粒径的停留时间基本相同, 约为 0.2 s, 说明在喷射角度大于一定角度时, 液滴与烟气可以充分混合, 液滴周围热传递量远大于其蒸发分解所需热量, 所以在粒径相差不是很大时, 蒸发分解时间近似一致。

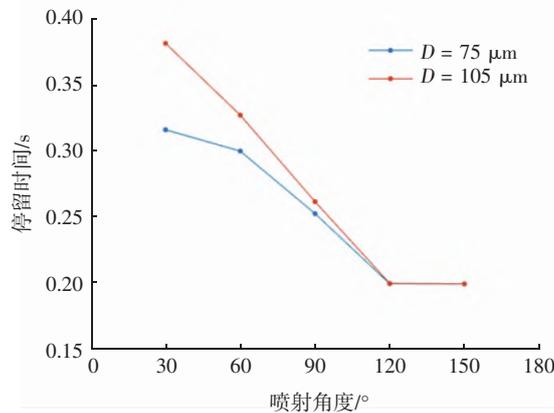


图 11 不同喷射角度液滴停留时间

### 3.4 静态混合器影响

静态混合器作为 SCR 脱硝系统中重要的混合装置, 能够提高还原剂与烟气的混合效率, 缩短混合距离, 而被广泛应用。在本文 3.2 节基础上, 增加“X”型静态混合器, 对不同液滴粒径下反应器入口催化剂上游截面氨浓度分布进行模拟计算, 计算结果如图 12 所示。

从图 12 可以看出, 与图 5 相比, 增加静态混合器后, 不同粒径氨浓度  $C_v$  值曲线变成更加规则的“U”型分布, 当液滴粒径  $D$  介于  $25 \mu\text{m} \sim 165 \mu\text{m}$  范围内时, 氨浓度  $C_v$  值都小于 5%, 相比于未设置混合器时, 浓度  $C_v$  值都有不同程度的降低; 整个液滴粒径计算范围内, 氨浓度  $C_v$  值都小于 7%, 混合效果明显。

如图 13 所示, 设置静态混合装置后, 首层催化剂入口氨与烟气混合效率显著提升, 平均效率提高达到 60.2%, 粒径  $D > 145 \mu\text{m}$  时, 效率提高值更加明显, 超过 70%。设置静态混合器, 增加烟气湍流运动, 使烟气湍动能增加, 液滴与烟气换热效率提高, 缩短了液滴颗粒停留时间, 停留时间相较于无静态混合器时缩短 20% 以上, 如图 14 所示。

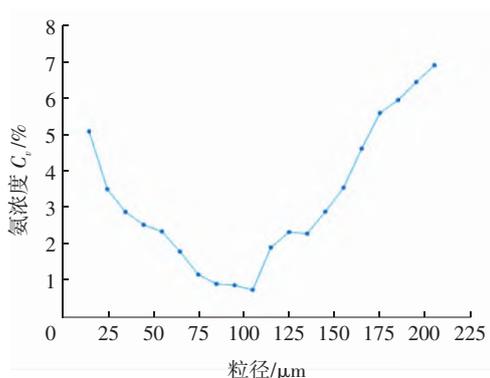


图 12 有混合器时不同粒径情况下氨浓度分布图

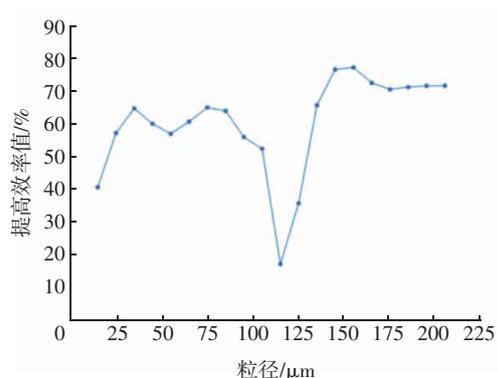


图 13 混合器对氨与烟气混合效率的影响

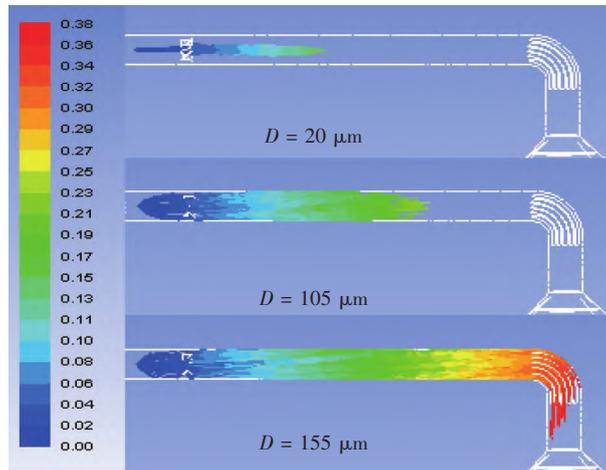


图 14 有静态混合器时不同粒径颗粒轨迹停留时间图

设置静态混合器虽有助于提高还原剂与烟气的混合效率,但是由于其阻塞作用,导致烟道内系统压降升高,如图 15 所示,设置静态混合器后系统总压降为 1 025 Pa,相比无静态混合器时的 820 Pa 总压降,升高 205 Pa,增加了系统能耗。

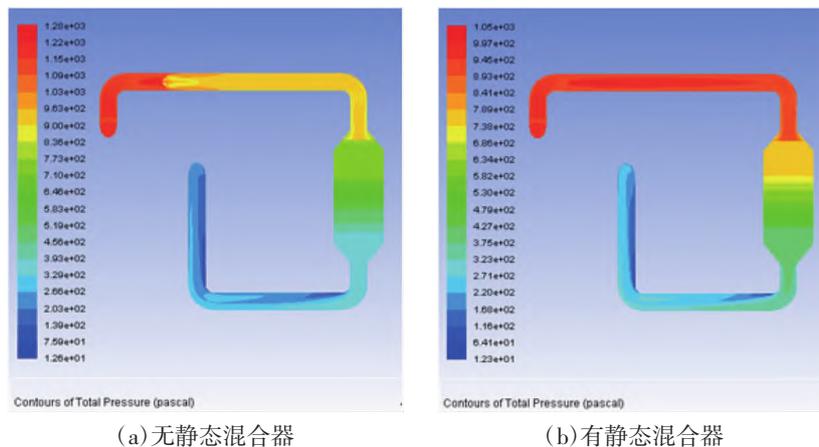


图 15 SCR 脱硝系统总压图

#### 4 结论

本文通过对某船舶柴油机 SCR 脱硝系统建模,采用 CFD 方法进行数值模拟计算,优化了 SCR 脱硝系统结构,研究分析了雾化液滴粒径、喷射角度和静态混合器对氨气分布的影响,总结如下:

(1)通过在 SCR 脱硝系统烟道和反应器内分别设置导流板和气流分布板,喷枪上游和催化剂入口烟气流速分布都有很大提高,为尿素液滴与烟气充分混合提供了流场保证。

(2)随着雾化液滴粒径的增大,液滴颗粒停留时间增长;不同粒径时催化剂入口氨分布  $C_v$  值呈近似的“U”型,过小或过大的液滴粒径都不利于氨的分布,当液滴平均粒径为  $105 \mu\text{m}$  时,氨浓度  $C_v$  值最小,为 1.61%。

(3)当液滴喷射角度  $\alpha < 120^\circ$  时,随着喷射角度的增大,液滴的停留时间缩短;当喷射角度  $\alpha = 120^\circ$  和  $\alpha = 150^\circ$  时,液滴停留时间基本相同,约为 0.2 s,而  $\alpha = 120^\circ$  时,氨浓度分布最均匀。

(4)静态混合器能够显著提高雾化后液滴与烟气的换热,缩短尿素液滴分解成氨气的时间,提高氨气与烟气的混合效率,平均混合效率提高 60.2%,但是由于烟道内较高的烟气流速及静态混合器的阻塞作用,使 SCR 脱硝系统总压降提高了 205 Pa。

#### 5 结束语

大型船舶柴油机产生的氮氧化物严重污染大气环境和海洋环境。选择性催化还原脱硝技术具有脱硝效率高、适用船舶种类广等优势,已成为船舶氮氧化物脱除的主要技术之一。计算流体动力学 CFD 方法作

为 SCR 脱硝技术的主要研究手段越来越多地被采用。本文以船舶主机 SCR 脱硝系统为研究对象, 采用计算流体动力学 CFD 数值模拟的方法, 着重研究了还原剂尿素溶液的不同参数对船舶柴油机脱硝系统流场的影响。从模拟计算结果中可以看出, 数值模拟可以很好地优化船舶尾气 SCR 脱硝流场并改进 SCR 系统设计结构, 合理的尿素溶液的雾化角度及雾化粒径匹配 SCR 脱硝系统结构能够显著改善脱硝系统氨浓度均匀分布, 以提高脱硝效率且降低系统阻力, 达到节能减排的良好效果。

#### 参考文献:

- [1] CARR E W, CORBETT J J. Ship compliance in emission control areas: Technology costs and policy instruments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015(16): 9584-9591.
- [2] 陈宁, 冯兆缘, 潘朝峰, 等. 船用 SCR 烟气脱硝系统的研究进展 [J]. *中外船舶科技*, 2017(4): 7-12.
- [3] CHEN D S, WANG X T, LI Y, et al. High-spatiotemporal-resolution ship emission inventory of China based on AIS data in 2014 [J]. *Science of The Total Environment*, 2017(609): 776-787.
- [4] 李灵祎. 主机废气高压脱硝系统(HP-SCR)介绍 [J]. *航海技术*, 2021(5): 63-67.
- [5] 李军伟, 张晓红, 张新民. 我国船舶大气污染物排放及控制研究 [J]. *资源节约与环保*, 2020(10): 94-97.
- [6] 李海娇. 船舶废气脱硫脱硝研究进展 [J]. *四川化工*, 2018(1): 17-20.
- [7] 王铮, 刘道银, 刘猛, 等. 船舶 SCR 脱硝尿素喷射分解及氨气分布均匀性的优化 [J]. *化工进展*, 2017(2): 742-749.
- [8] 陈冯, 王谦, 何志霞, 等. 柴油机 Urea-SCR 尿素喷射过程参数优化及数值模拟研究 [J]. *内燃机工程*, 2015(1): 23-30.
- [9] 王谦, 张铎, 何志霞, 等. 柴油机 Urea-SCR 系统数值模拟与混合器结构优化 [J]. *内燃机学报*, 2015(3): 50-57.
- [10] 温苗苗, 吕林, 高孝洪. 柴油机选择性催化还原后处理系统仿真 [J]. *内燃机学报*, 2009(3): 249-254.
- [11] 温苗苗, 吕林. 柴油机选择性催化还原后处理系统建模 [J]. *航海工程*, 2009(3): 68-71.
- [12] 陈代金, 郑明刚, 许伯彦, 等. 柴油机选择性催化还原后处理系统的数值模拟 [J]. *山东建筑大学学报*, 2012(4): 390-415.
- [13] 谭丕强, 杜加振, 胡志远, 等. 关键运行参数对柴油机 SCR 系统性能的影响 [J]. *化工学报*, 2014(10): 4063-4070.
- [14] 唐韬, 赵彦光, 华伦, 等. 柴油机 SCR 系统尿素水溶液喷雾分解的试验研究 [J]. *内燃机工程*, 2015(1): 1-5.
- [15] 刘丙善. Urea-SCR 排气后处理系统在重型柴油机中的应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [16] 叶呈炜, 吕林, 刘丙善. 尿素法同时脱硫脱硝试验研究 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2018(3): 478-482.

(责任编辑: 张 利)

## CFD Flow Field Simulation and Design Optimization of the SCR Denitration for a Ship's Main Engine

ZHANG Cheng-jian<sup>1,2</sup>, YU Hong-min<sup>1,2</sup>, ZHAO Jian<sup>1</sup>, HE Jing-ying<sup>1</sup>, WU Wei-hong<sup>1,3</sup>, LIU Shao-jun<sup>3</sup>

(1. Institute of Atmosphere, Zhejiang University Energy Engineering Design and Research Institute Co., Ltd, Hangzhou 310027, China;

2. Research and Development Center, Lantian Environmental Protection Facilities Engineering Co., Ltd, Hangzhou 310012, China;

3. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Based on a ship's main engine SCR denitration system, a CFD method is used to conduct flow field simulation research and structural optimization design. Firstly, the system structure is optimized by arranging baffles and gas distribution plates in the flue and reactor. Secondly, the effects of droplet atomization average particle size  $D$  and spray angle  $\alpha$  on the ammonia concentration at the catalyst inlet were studied respectively. The results show that the smaller the droplet average particle size and the larger the spray angle, the shorter the droplet residence time. Finally, the effect of the static mixer on ammonia concentration distribution was studied, and the results show that the static mixer could significantly improve the mixing efficiency of ammonia and flue gas, with an average value of 60.2%.

**Key words:** ship; SCR denitration; flow field; numerical simulation; design optimization