DOI:10. 3969/j. issn. 1674-1951. 2021. 05. 007

分布式能源站天然气内燃机 Urea-SCR 系统模拟 优化研究

Simulation and optimization for Urea–SCR system of the natural gas internal combustion engine in a distributed energy station

赵大周^{1,2},王明祥³,阮慧锋^{1,2},谷菁^{1,2},王明晓^{1,2} ZHAO Dazhou^{1,2},WANG Mingxiang³,RUAN Huifeng^{1,2},GU Jing^{1,2},WANG Mingxiao^{1,2}

(1.华电电力科学研究院有限公司,杭州 310030; 2.浙江省蓄能与建筑节能技术重点实验室,杭州 310030;3.广州大学城华电新能源有限公司,广州 511400)

 Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China; 2. Zhejiang Important Laboratory of Energy Storage and Building Energy Saving Technology, Hangzhou 310030, China;
 Guangzhou Higher Education Mega Center Huadian New Energy Company Limited,

Guangzhou 511400, China)

摘 要:为提高Urea-SCR系统的NO₂ 脫除率,以某分布式能源站9.7 MW 天然气内燃机Urea-SCR系统为研究对象, 通过建立三维数值模型,研究了不同喷射位置条件下反应器内静态混合器、多孔板对流场、NH₃转化率及NH₃摩尔 分数分布的影响。模拟结果表明:喷射位置距离首层催化剂越远,首层催化剂截面NH₃转化率越高、NH₃摩尔分数 分布越均匀;挡板式静态混合器会破坏首层催化剂入口速度分布的均匀性,不利于NH₃的转化及混合;入口渐扩段 布置多孔板能够有效改善首层催化剂入口前流场的均匀性,提高NH₃的转化率,但不利于NH₃的混合。采取在备用 层催化剂处布置多孔介质的措施,可获得较为理想的NH₃转化率及分布的均匀性。

关键词:分布式能源站;天然气内燃机;NO,;Urea-SCR系统;数值模拟;多孔板;混合器;NH,转化率;均匀性

中图分类号:TK 402:X 701 文献标志码:A 文章编号:1674-1951(2021)05-0045-08

Abstract: In order to improve the NO_x removal rate of a Urea–SCR system, a three-dimensional numerical model of a 9.7 MW natural gas internal combustion engine's Urea–SCR system was established. The effects of the static mixer, porous plate in the reactor on flow field, NH₃ conversion rate and NH₃ mole fraction distribution were studied. Simulation results show that, the farther the injection location is from the first-layer catalyst, the higher the NH₃ conversion rate is and the more evenly the NH₃ distributes. A baffle static mixer will hamper the uniformity of flow velocity at the inlet of the first layer catalyst, which is not conducive to the transformation and mixing of NH₃. The porous plates arrangement in the diffuser can effectively improve the uniformity of the flow field in front of the inlet of the first layer catalyst and improve the conversion of NH₃. However, it is not conducive to the mixing of NH₃. Laying porous media on the standby layer of catalyst, an ideal conversion rate and decent NH₃ uniformity can be obtained.

Keywords: distributed energy station; natural gas internal combustion engine; NO_x ; Urea-SCR system; numerical simulation; porous plate; mixer; NH_3 conversion rate; uniformity

0 引言

分布式能源系统具有能源利用效率高、系统灵 活性好、能源供应可靠等特点,已成为国内外能源 技术重要的发展方向。楼宇型分布式能源系统是 分布式能源系统的主要形式之一,布置于人群密集 楼宇型分布式能源系统多采用天然气内燃机作为 系统的原动机,但天然气内燃机高NO_x排放会对周 边环境造成较大影响,目前北京市已发布相关标准 对其排放进行限制^[2]。

的城市中,为系统周边建筑提供冷、热、电等负荷^[1]。

选择性催化还原(Selective Catalytic Reduction, SCR)技术因脱硝效率高、技术成熟,在燃煤电站、化 工、柴油机尾气 NO_x脱除中得到广泛应用。尿素溶 液(Urea)具有安全、易运输的优点,被大多数 SCR系

收稿日期:2021-01-29;修回日期:2021-04-12 基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0905101)

统作为还原剂^[3]。尿素由喷嘴喷出,经过蒸发分解 产生还原剂 NH₃,与烟气混合进入催化剂进行 NO_x 脱除反应。对于脱硝反应而言,提高进入催化剂前 NH₃摩尔分数和 NH₃与 NO_x物质的量之比(以下简称 NH₃/NO_x比)的均匀性是提高 NO_x脱除率的关键因 素^[4-6]。若尿素溶液不能在进入催化剂前有效地蒸 发、热解,则还原剂 NH₃不足;若 NH₃/NO_x比分布不 均匀,则局部富 NH₃区域会出现 NH₃逃逸,而 NH₃不 足的区域 NO_x脱除率不高。

数值模拟作为一种高效、便捷的技术手段,越 来越多地应用于SCR系统的优化设计中。目前多 数学者针对柴油机 Urea-SCR 进行了优化模拟研 究:谭理刚等^[7]建立了柴油机三维 Urea-SCR 喷射雾 化数值模型,研究了喷射位置、方向、喷孔数目与孔 径对催化剂入口NH,摩尔分数分布的影响,模型得 到了试验验证;王谦等^[8]模拟对比了柴油机Urea-SCR系统中挡板式及叶片式静态混合器的混合效 果;陈贵升等¹⁹研究了不同整流器及混合器对SCR 反应器内NH。均匀性的影响;王文晓等^[10]通过数值 模拟并结合试验研究了喷雾锥角对结晶及脱硝效 率的影响;Tan等^[11]研究对比了静态混合器单层布 置、双层布置时,NH。的转化率与分布的均匀性;Zhu 等^[12]研究对比了船用柴油机5种静态混合器对SCR 系统压力损失、速度分布的均匀性、NH、分布均匀性 的影响;王铮等^[13]建立了某船用柴油机SCR数值模 型,研究了烟气入口湍流强度、烟气温度、扰流器的 结构对NH。分布均匀性的影响,最终得到最佳扰流 器的结构。上述文献大多针对车用柴油机或大型 柴油发电机 Urea-SCR 系统进行模拟研究,针对天 然气内燃机脱硝技术的研究较少,而目前天然气内 燃机脱硝系统的设计大多借鉴柴油机 Urea-SCR系 统设计方法。

与柴油机相比较,天然气内燃机主要有以下几 方面的不同:(1)中高负荷稳定运行,无频繁启停; (2)排烟温度较高,一般最低排烟温度在360℃以 上;(3)由于燃料为天然气,因此烟气中几乎不含 SO₂及颗粒物等;(4)烟气量大,排气管管径大。

柴油机内燃机与天然气内燃机的燃料、燃烧方 式、运行方式等均不相同,因此Urea-SCR脱硝系统 的特点也不尽相同。本文借助商业流体力学计算 软件 FLUENT,研究国内某商务区分布式能源站 9.7 MW 天然气内燃机 Urea-SCR 反应器内流场及 NH₃摩尔分数分布的特点,重点模拟对比不同喷射 位置条件下静态混合器、多孔板对流场、NH₃转化率 及摩尔分数分布均匀性的影响,为同类型天然气内 燃机脱硝改造提供参考。

1 模型的建立

1.1 几何模型

本文研究对象为国内某商务区分布式能源站 9.7 MW 天然气内燃机配套的 Urea-SCR 脱硝反应 器,原始反应器几何模型如图1所示。



原设计方案在反应器内部布置了静态混合器, 以提高还原剂的混合效果;在人口渐扩段布置了开 孔率为36%的多孔板,以提高速度分布的均匀性。 催化剂采用"2+1"布置方案:先布置2层催化剂,靠 近入口段的一层为备用层,催化剂尺寸为3375 mm×2455 mm×315 mm(长×宽×高)。

采用三维绘图软件 Pro/E 5.0进行全尺寸建模, 忽略反应器内部对流场影响较小的钢梁及支撑结构。模型建立后导入 ANSYS GAMBIT 2.4进行网格 划分,规则的几何体采用规则的六面体或楔形网格,带混合器及多孔板的几何体采用局部加密的不 规则网格,模型总网格数约1 300 万,如图2所示。



 1.2.1 气相方程 烟气为湍流流动,控制方程包括能量方程、连 续性方程、动量方程、标准*k-*ε方程,其通用形式可 表示为

$$\operatorname{div}(\rho u \varphi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \varphi) + S, \qquad (1)$$

式中: ρ 为烟气密度,kg/m³;u为烟气流速,m/s; φ 为通用变量; Γ 为广义扩散系数;S为广义源项。

1.2.2 多孔介质模型

为了简化催化剂的几何结构,将催化剂用多孔 介质模型替代,多孔介质模型的动量方程附加了动 量源项

$$S_{i} = C_{1}\mu_{0}u_{i} + C_{2}\frac{1}{2}\rho |u_{i}|u_{i}, \qquad (2)$$

式中: S_i 为i方向动量方程附加源项,kg/(m²·s²); C_1 为黏性阻力系数,m⁻²; μ_0 为烟气黏滞系数,kg/(m·s); u_i 为i方向催化剂上方截面平均速度,m/s; C_2 为惯 性阻力系数,m⁻¹。

1.2.3 喷雾模型

认为尿素溶液离开喷嘴即为离散的液滴,尿素 溶液的喷雾模拟采用离散液滴模型(Discrete Droplet Model, DDM),采用拉格朗日和欧拉方法求 解液滴的运动轨迹。先计算连续场,然后结合流场 求解每个颗粒的受力,获得粒子的速度,进而追踪 每个颗粒的轨道及参数沿轨道的变化。颗粒的受 力平衡方程为

$$\frac{du_{d}}{dt} = F_{D}(u_{e} - u_{d}) + \frac{g(\rho_{p} - \rho_{f})}{\rho_{p}} + F_{x}, \quad (3)$$

$$F_{\rm D} = \frac{18\nu_{\rm f}}{\rho_{\rm p}d_{\rm p}^2} \times \frac{C_{\rm D}\,Re}{24}\,,\tag{4}$$

式中: u_a 为离散相速度,m/s; F_p 为拽力,N; u_c 为连续 相速度,m/s;g为重力加速度,m/s²; ρ_f 为流体密度, kg/m³; ρ_p 为颗粒密度,kg/m³; d_p 为颗粒直径,m; F_x 为 湍流脉动对颗粒的作用力,N; ν_f 为流体黏度,Pa·s; C_p 为拽力系数;Re为雷诺数。

采用随机漫步(Random Walk, RW)模型考虑湍 流对粒子运动的影响;同时,采用泰勒类比破碎 (Taylor Analogy Breakup, TAB)模型考虑液滴的二次 破碎。液滴与混合器壁面的相互作用采用文献 [14]提出的模型。

1.2.4 尿素溶液的蒸发热解模型

尿素溶液喷入反应器内受热后水分被蒸发,尿 素蒸发速率由其自身浓度梯度扩散规律控制

$$v_{1} = k_{c}(c_{1,s} - c_{1,\infty}), \qquad (5)$$

式中: v_1 为液滴蒸发速率; k_e 为传质系数,m/s; $c_{1,s}$ 为液 滴表面蒸汽的浓度,kmol/m³; $c_{1,x}$ 为当地气相蒸汽的 浓度,kmol/m³。

尿素溶液中的水蒸发后,产生固体或熔化的尿素,随之热解为NH,及HCNO,反应式为

$$(\mathrm{NH}_2)_2\mathrm{CO}(1) \rightarrow (\mathrm{NH}_2)_2\mathrm{CO}(\mathrm{s}) + \mathrm{H}_2\mathrm{O}(\mathrm{g}), \quad (6)$$
$$(\mathrm{NH}_2)_2\mathrm{CO}(\mathrm{s}) \rightarrow \mathrm{NH}_3(\mathrm{g}) + \mathrm{H}\mathrm{CNO}(\mathrm{g})_\circ \quad (7)$$

同时,HCNO发生如下水解反应

$$\mathrm{HCNO}(\mathrm{g}) + \mathrm{H}_2\mathrm{O}(\mathrm{g}) \to \mathrm{NH}_3(\mathrm{g}) + \mathrm{CO}_2(\mathrm{g})_\circ \quad (8)$$

对于均相反应,其反应速率可用阿伦尼乌斯定 律描述

$$= A \times e^{-\frac{E}{RT}},$$
 (9)

式中:r为反应速率常数, s^{-1} ;A为指前因子, s^{-1} ;E为 反应活化能,J/kmol;R为摩尔气体常数,J/(mol·K); T为反应温度,K。

化学反应动力学参数见表1[15-16]。

表1 化学反应动力学参数

ab. 1	Kinetic	parameters	of the	chemical	reaction
-------	---------	------------	--------	----------	----------

反应式	指前因子/(s ⁻¹)	活化能/(J·kmol ⁻¹)
$CO(NH_2)_2 \rightarrow NH_3 + HCNO$	4 900	2.30×107
$HCNO+H_2O\rightarrow NH_3+CO_2$	250 000	4.46×107

2 模拟条件

Т

模拟研究稳态定常流动,假设烟气为不可压缩 牛顿流体且流动过程中与外界无能量交换。

相关文献研究发现,烟气温度的提高有利于尿 素分解及NH₃的混合^[15],由于天然气内燃机大多数 情况下满负荷运行且满负荷条件下排烟温度最低、 烟气量最大、最不利于脱硝,因此本文以100%负荷 率工况为例进行模拟计算,内燃机相关参数见表2。 表3为不同负荷率下的烟气特性,入口采用速度入 口边界条件,结合反应器尺寸得出烟气入口速度为 25.77 m/s,温度为650 K,湍流强度为3.05%,出口 采用压力出口边界条件。设计条件下尿素质量分 数为32.5%的尿素溶液流量为0.010 42 kg/s,喷射 参数见表4。

表 2 内燃机相关参数 Tab. 2 Relevant parameters of the internal combustion engine

项目	单位	参数
型号		瓦锡兰W20V34SG
额定功率	kW	9 780
转速	r/min	750
允许的排气背压	kPa	5
气缸数量	个	20

3 模拟结果与分析

工程中多以相对标准偏差C,来定量描述变量 分布的不均匀性,其定义为

$$C_{v} = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%, \qquad (10)$$

表3 排烟特性 Tab. 3 Characteristics of flue gas 项目 单位 参数 % 内燃机负荷率 100 75 50 $^{\circ}$ C 排烟温度 377 406 431 NO_x质量浓度(干基、 500 500 mg/m³ 500 标态、5% 02) 烟气量(湿) 41 932 56 119 29 116 kg/h

Tab. 4 Parameters of injection

项目	单位	参数
喷射压力	MPa	7.5
尿素溶液初始温度	К	300
喷孔直径	mm	1
喷雾半锥角	(°)	15
粒径分布		Rosin-Rammler 函数
喷嘴类型		实心锥

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2},$$
 (11)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i, \qquad (12)$$

式中: x_i 为截面测量点的速度, $m/s;\bar{x}$ 为截面测量数据的平均值, $m/s;\sigma$ 为标准差。

此外,引入NH₃转化率η来定量表述尿素转化 为NH₃的量

$$\eta = \frac{\rho_{\rm NH_3}}{\rho_{\rm urea - NH_3}} \times 100\%, \qquad (13)$$

式中: ρ_{NH_3} 为烟气中NH₃的质量浓度, kg/m³; $\rho_{urea-NH_3}$ 为烟气中尿素完全转化时NH₃的质量浓度, kg/m³。

3.1 系统速度场分布的模拟研究

4

在未考虑尿素喷射的前提下,本文首先研究了 是否布置静态混合器、多孔板对首层催化剂入口烟 气平均速度、速度相对标准偏差以及系统压降的影 响。分别设置了4种对比工况,见表5。

_

表5 不同工况设置

模拟计算得到多孔板布置于首层催化剂+X方向0.02m处速度分布云图,如图3所示。

有

有

对比图3中工况1及工况2可看出,多孔板的布 置可改善首层催化剂入口速度的均匀性,首层催化 剂+X方向0.02m截面最大速度由8.70m/s降至



分布云图

Fig. 3 Cloud map of velocity distribution at 0. 02 m in the *X* direction with porous plates arranged on the first layer catalyst

4.60 m/s,平均速度由5.66 m/s降至4.10 m/s,速度 相对标准偏差由23.1%降至10.5%。100%负荷率 下,多孔板前后压降约为106 Pa。由于首层催化剂 的整流作用,第2层催化剂入口速度相对标准偏差 均在5.0%以内。

同时,对比工况1及工况3可看出,静态混合器 加剧了气流的扰动,首层催化剂入口速度分布的均 匀性略有降低,静态混合器前后压降约为34 Pa。不 同工况下系统内平均速度及压降见表6。

表 6 不同工况下平均速度及压降模拟计算结果 Tab. 6 Simulation results of velocity and pressure drop under different working conditions

工况	首层催化剂入口 平均速度/(m・s ⁻¹)	首层催化剂入口速 度相对标准偏差/%	系统压降/Pa
1	5.66	23.1	653
2	4.10	10.5	759
3	6.15	27.2	687
4	4.33	14.9	793

3.2 系统NH,转化率及摩尔分数分布的模拟研究 模型选用的静态混合器为挡板型,共7层,每层 中间部位有向上倾斜的叶片,两侧为向下倾斜的叶片,最后一层无向下倾斜的挡板,模型结构如图4 所示。



图 4 挡板式静态混合器 Fig. 4 Baffle static mixer

模拟对比喷嘴位于烟道轴线上且距离首层催 化剂6种不同喷射位置条件下,静态混合器、多孔板 对NH,转化率及NH,摩尔分数分布的影响。模拟计 算得到喷射位置距离首层催化剂8m时反应器内 NH,摩尔分数分布情况,如图5所示。由图5可以看 出,尿素溶液从喷口喷出后,在烟道内受热蒸发产 生NH,沿喷射方向在反应器内逐渐扩散,摩尔分数 逐渐增大。

不同工况下NH。扩散表现出不同的规律。

(1)对于工况1及工况2,喷射进入反应器内的 尿素溶液受重力、曳力等作用向-Y方向运动,最终 NH,富集于首层催化剂入口截面-Y方向附近。

(2)对于工况3及工况4,由于静态混合器的存 在,尿素溶液分解的NH₃向+Y方向运动,最终富集 于首层催化剂入口截面+Y方向附近。

(3)同时对比图 3—4 可看出,速度大的区域 NH₃的摩尔分数小,而速度小的区域 NH₃的摩尔分 数大。这是由于速度大的区域中间物质 HNCO 的水 解反应不完全,因此要尽量避免局部高速区。

模拟计算6种喷射位置下首层催化剂入口截面 NH₃转化率,如图6所示。由图6可以看出:随着喷 射位置与首层催化剂距离的增加,NH₃的转化率提 高,这是由于随着喷射距离的增加,尿素热解及 HNCO水解的时间变长,NH₃转化率提高;同时,随 着距离的增加,NH₃转化率增幅变缓;在相同的喷射 位置下,工况2获得最高的NH₃转化率,这主要是由 于多孔板有效提升了流速分布的均匀性,减小了局 部高速气流区,提升了局部高速区NH₃的转化率;工 况3下NH₃转化率最低,结合图3可以看出,工况3 下首层催化剂速度分布均匀性最差,直接影响NH₃ 的生成。



模拟计算得到不同喷射位置下首层催化剂入口NH,摩尔分数分布相对标准偏差,如图7所示。 由图7可以看出:随着喷射距离的增加,首层催化剂入口NH,摩尔分数分布的均匀性提升;在相同的喷射位置,工况1均匀性最佳,工况2均匀性最差。



反应器内NH,摩尔分数流线图如图8所示。结合图8解释图7现象产生的原因,由图8可以看出: 当烟气由烟道进入主反应器时,由于截面突然扩张,烟气在入口渐扩段内形成涡流,促进了NH,的扩散与混合;布置多孔板后,入口渐扩段内流场变均 匀,NH,扩散减弱,不利于其混合。

当喷射位置距离首层催化剂9m以上时,工况1 及工况3的首层催化剂入口NH₃摩尔分数相对标准 偏差均在10%以内。

4 系统优化策略模拟研究

由上文可以看出,静态混合器对NH₃转化率的 提升及NH₃摩尔分数分布均匀性的提升均无促进作 用;布置多孔板可提升NH₃的转化率,但不利于NH₃ 的混合,不布置多孔板NH₃的转化率又不够理想。 考虑到NH₃混合主要发生在入口渐扩段,本文提出 将多孔板布置于备用层催化剂处的改进措施:一方 面烟中的NH₃在入口渐扩段获得较为理想的混合空 间,有利于NH₃的混合;另一方面能够提升进入首层 催化剂前烟气流速的均匀性,有利于NH₄的生成。

为简化模型,将首层催化剂当作多孔介质处 理,以模拟整流效果。假设多孔介质孔隙率为 90%,模拟得到在喷射位置距离首层催化剂10m时 NH₃摩尔分数分布及速度分布图,如图9所示。由 图9可以看出,优化后首层催化剂入口速度的均匀 性进一步增加,而入口渐扩段仍存在一定的空间形 成涡流,促进了NH₃的扩散与混合。





NH₃的转化率及NH₃摩尔分数相对标准偏差与 工况1及工况2的对比如图10所示。由图10可以 看出,在保证NH₃分布均匀性的前提下,在备用层催 化剂处设计多孔板,可一定限度提升NH₃的转化率, 并且NH₃摩尔分数相对标准偏差能控制在5%以内。 而此时模拟得到的系统压降仅增加了100 Pa。





5 结论

本文建立了国内某商务区分布式能源站9.7 MW天然气内燃机Urea-SCR系统三维数值模型,分 别模拟研究了满负荷时不同喷射位置条件下多孔 板、静态混合器对流场、尿素分解率及还原剂NH,摩 尔分数分布均匀性的影响,得出如下结论。

(1)随着喷射系统距离首层催化剂距离的增加,尿素分解率及还原剂NH₃摩尔分数的均匀性均 有不同限度的提升。

(2)多孔板能改善催化剂入口速度分布的均匀 性,降低局部高速气流,一定限度提升NH₃的转化 率;但由于其减少了入口段气流的扰动,因此不利 于NH₃摩尔分数分布均匀性的提升。

(3)模型中的挡板式静态混合器对 NH₃转化率的提升及对 NH₃摩尔分数分布均匀性的提升均无促进作用。

(4)柴油机 Urea-SCR 系统布置空间有限,因此 需要静态混合器等在较短的距离内获得较高的 NH, 转化率及 NH,摩尔分数分布的均匀性;对于本文研 究的有足够脱硝改造空间的天然气内燃机 Urea-SCR 系统,静态混合器、整流器等并非必需。

参考文献:

[1]余莉.浅析楼宇式天然气分布式供能系统的开发与设计 [J].华电技术,2018,40(5):73-74.

YU li. A brief analysis on the development and design of building type distributed natural gas power supply system [J]. Huadian Technology, 2018, 40(5):73-74.

- [2]固定式内燃机污染物综合排放标准:DB 11/1056-2013[S].
- [3]孙克勤.火电厂烟气脱硝技术及工程应用[M].北京:化 学工业出版社,2006.
- [4]王朝阳,陈鸿伟,王广涛,等.双变截面SCR脱硝系统导流板优化设计[J].环境工程学报,2018,12(10):2818-

2824.

WANG Zhaoyang, CHEN Hongwei, WANG Guangtao, et al. Optimization design of deflector for SCR denitration system with double variable cross-section [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12 (10) : 2818-2824.

- [5]江婷,胡永锋,宋洪涛,等.楼宇型分布式能源系统SCR 脱硝数值模拟研究[J].华电技术,2019,41(3):1-7.
 JIANG Ting, HU Yongfeng, SONG Hongtao, et al.Numerical simulation research on SCR denitration in a building type distributed energy system[J]. Huadian Technology, 2019, 41(3):1-7.
- [6]王卫群,张磊,黄治军,等. 基于 CFD 模拟计算的 SCR 脱 硝系统喷氨优化试验方法[J].中国电力,2020,53(6): 185-190.

WANG Weiqun, ZHANG Lei, HUANG Zhijun, et al. Test method for ammonia injection optimization of SCR denitrification system based on CFD simulation calculation [J]. Electric Power, 2020, 53(6):185-190.

[7]谭理刚,何利华,寇传富,等.柴油机Urea-SCR系统喷 射雾化的数值模拟[J].环境工程学报,2014,8(4): 1554-1560.

TAN Ligang, HE Lihua, KOU Chuanfu, et al. Numerical simulation on spray atomization of diesel engine Urea-SCR system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(4): 1554-1560.

- [8]王谦,张铎,王静,等.车用柴油机 Urea-SCR 系统数值分析与参数优化[J].内燃机学报,2013,31(4):343-348.
 WANG Qian, ZHANG Yi, WANG Jing, et al. Numerical analysis and parametric optimization on Urea-SCR system of vehicle diesel[J].Transactions of CSICE, 2013, 31(4): 343-348.
- [9]陈贵升,杨锐敏,和志高,等.选择性催化还原混合器及整 流器的设计与结构优化[J].内燃机工程,2020,41(2): 46-53.

CHEN Guisheng, YANG Ruimin, HE Zhigao, et al. Design and structure optimization of selective catalytic reduction mixer and rectifier [J]. Chinese Internal Combustion Engineer Engineering, 2020,41(2):46-53.

[10]王文晓,朱智富,赵英良,等.发电柴油机选择性催化还 原系统尿素喷雾锥角的仿真及试验研究[J].内燃机工 程,2020,41(1):64-69.

WANG Wenxiao, ZHU Zhifu, ZHAO Yingliang, et al. Simulation and experimental study on urea spray cone angle of selective catalytic reduction system for a generating set diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engineer Engineering, 2020,41(1):64-69.

[11]TAN Ligang, FENG Pengfei, YANG Shubao, et al. CFD studies on effects of SCR mixers on the performance of urea conversion and mixing of the reducing agent[J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2018, 123:82-88.

- [12]ZHU Yuanqing, LI Tinghui, XIA Chong, et al. Simulation analysis on vaporizer/mixer performance of the highpressure SCR system in a marine diesel [J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2018, 148:1-9.
- [13] 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,2017,36(2): 742-749.

WANG Zheng, LIU Daoyin, LIU Meng, et al. Optimization of uniformity of NH₃ distribution and thermolysis of urea in the SCR marine process [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(2):742–749.

[14]KUHNKE D. Spray/wall-interaction modelling by

dimensionless data analysis [M]. Aachen: Shaker Verlag GmbH,2004.

- [15]CHOI C, SUNG Y, CHOI G M, et al.Numerical analysis of NO_x reduction for compact design in marine urea-SCR system [J].International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2015, 7(6):1020-1034.
- [16]YIM S D, KIM S J, BAIK J H, et al.Decomposition of urea into NH₃ for the SCR process [J].Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43(16):4856–4863.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

赵大周(1990—),男,山东枣庄人,工程师,硕士,从事综合能源系统负荷预测与系统集成优化等方面的研究(E-mail;seudzz@126.com)。

环保公益广告
郑州科润机电工程有限公司(后插 2)
华电水务科技股份有限公司(跨版)(后插 3,4)
华电环保系统工程有限公司(跨版)(后插 5,6)
中国华电科工集团有限公司新能源
技术开发公司
国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术
研发(实验)中心(后插 8)
华电综合智慧能源科技有限公司(后插 9)
华电通用轻型燃机设备有限公司(后插 10)

告索引

广

郑州科源耐磨防腐工程有限公司(跨版)(后插 11,12
华电重工股份有限公司(跨版)(后插 13,14
中国华电科工集团有限公司总承包
分公司(跨版)(后插 15,16
华电技术
山东华电节能技术有限公司(后插 18)
华电科工安全环境质量科学研究所(后插 19)
华电郑州机械设计研究院有限公司(封三)
中国华电科工集团有限公司(封底)