

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.03.001

楼宇型分布式能源系统 SCR 脱硝 数值模拟研究

Numerical simulation research on SCR denitration in a building-type
distributed energy system

江婷^{1,2}, 胡永锋^{1,2}, 宋洪涛^{1,2}, 李建标^{1,2}, 沈建永¹, 徐静静^{1,2}, 张爱平^{1,2}
JIANG Ting^{1,2}, HU Yongfeng^{1,2}, SONG Hongtao^{1,2}, LI Jianbiao^{1,2},
SHEN Jianyong¹, XU Jingjing^{1,2}, ZHANG Aiping^{1,2}

(1. 中国华电科工集团有限公司, 北京 100070; 2. 国家能源分布式能源技术研发中心, 北京 100070)

(1. China Huadian Engineering Company Limited, Beijing 100070, China; 2. National Energy
Distributed Energy Technology Research and Development Center, Beijing 100070, China)

摘要:燃气分布式能源系统燃烧产生的氮氧化物难以满足日益严格的环保排放要求;同时,燃气分布式能源系统的结构特点决定其脱硝系统必须紧凑布置。采用 Fluent 软件对某楼宇型分布式能源站拟建的选择性催化还原脱硝装置进行数值模拟研究,初步引入导流板、整流栅及气流均布板等结构,提出了3种不同的改进方案,定量分析了烟道内的速度场、组分场及温度场的分布规律。结果表明:加装导流板及整流器可有效改善混合器及反应器内流场的均匀性,气流均布板结构促进了第1层催化剂入口断面内流场的均匀性;相比于原方案,改进之后的脱硝装置中 NO 及 NH₃ 在第1层催化剂层的速度、质量分布及温度的均匀度明显提高,且速度不均匀度为 20.81%,满足预期设计要求。可为楼宇型分布式能源系统脱硝提供参考,同时也可作为系统装置后期的优化设计奠定基础。
关键词:分布式能源系统;选择性催化还原脱硝;结构改进;数值模拟

中图分类号:X 773 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2019)03-0001-07

Abstract: The nitrogen oxides produced during combustion process of the distributed energy system driven by natural gas are still difficult to satisfy the requirements of China's increasingly stringent environment emission standard. Meanwhile, the layout of denitrification system has to be compact according to the structural of gas distributed energy system. The software Fluent is used to simulate the selective catalytic reduction and denitrification device of a building-type distributed energy station. Flow deflector, aerodynamic grid and airflow distribution board are briefly introduced, and 3 different improvement schemes are proposed. Quantitative analyses on the distribution of velocity, composition and temperature fields in the gas ducts are made. The results show that the flow deflector and aerodynamic grid can effectively improve the uniformity of the flow field in the mixer and the reactor. The airflow distribution board promote the uniformity of the flow field in the inlet of the first catalyst layer. Compared with the original scheme, the uniformity of velocity, mass distribution and temperature uniformity of the NO and NH₃ on the first catalyst layer are improved obviously, and the velocity nonuniformity is only 20.81%, which satisfied the requirements. The results can provide reference for denitrification of building-type distributed energy system, and set a foundation for the following optimization design.

Keywords: distributed energy system; selective catalytic reduction denitrification; structural improvement; numerical simulation

0 引言

随着我国经济的发展,传统的能源利用结构不

合理问题及生态环境问题日益突出,因此,亟待提高能源利用效率和保证能源利用的安全性。天然气分布式能源利用系统由于具有高效、节能、环保^[1-3]等特点而被大力推广应用,随着国家相继出台一系列建设天然气分布式能源项目利好政策,各地纷纷开展分布式能源站的建设。目前,天然气分布式

能源系统主要分为区域型和楼宇型,主机分别采用燃气轮机和内燃机。楼宇型天然气分布式能源系统采用内燃机,其燃烧过程中会产生大量氮氧化物^[4-5],以北京市某一楼宇型分布式能源系统为例,其内燃机的氮氧化物排放质量浓度通常达 500 mg/m³ 以上,根据 DB 11/1056—2013《固定式内燃机大气污染物排放标准》要求,内燃机氮氧化物排放质量浓度应低于 75 mg/m³,如果不进行脱硝处理,无法满足日益严格的环保排放要求。

与传统的火电厂脱硝方式不同,楼宇型分布式能源系统结构紧凑,要求脱硝系统的布局 and 系统流程紧凑,而选择性催化还原 (SCR) 脱硝法的脱硝效率与烟气和还原剂的混合长度、混合均匀性有直接关联,因此需要深入把握楼宇式分布式能源站 SCR 脱硝装置内部流动规律,并开展数值模拟研究。侯建鹏^[6]以环境科学研究所大气环境污染控制实验室现有的 SCR 脱硝中的试验装置为原形,进行烟气脱硝系统数值模拟研究,经过多组模型调整,最终确定了多向导流片的布置方式,其流场均布情况可满足工况要求,但其模拟结果缺少试验数据的验证。韩发年等^[7]研究了 SCR 烟气脱硝工艺喷氨混合装置,指出简易、高能 and 稳定的静态混合结构可降低建设和运行成本,提高操作弹性。Streiff 等^[8]发明了一种兼有偏转和旋流的导流板型混合装置,导流板夹角和扭曲度的优化可降低阻降,缩短混合距离。潘伶等^[9]对 SCR 脱硝反应器烟道内部流场进行数值模拟与优化,得出导流板可以改善烟道内气流分布,整流器对改善气流流动、避免涡流具有重要作用且对压降影响较小的结论。这些文献大多数采用数值模拟的方式对烟道流场或混合器进行了研究,很少根据工程实例进行模拟,大部分都是基于传统火电厂脱硝而言的,结构要求较为宽松。而目前针对楼宇型天然气分布式能源系统脱硝的研究在国内少

有开展,尚处于摸索尝试阶段,因此,需要开展深入的课题研究。

1 系统概况

本文以北京市某楼宇型分布式能源项目工程为例,针对其结构进行 SCR 脱硝系统布置,并根据模拟结果提出改造措施,以满足环保要求,达到理想脱硝效果。拟建的 SCR 脱硝装置结构如图 1 所示,脱硝装置自内燃机排烟口位置开始,经管道与混合器及反应器相连接,最后接入烟气热水型溴化锂吸收式制冷系统。借鉴火电厂脱硝装置的研究经验,需要保证脱硝反应器中催化剂入口截面位置气流流速与反应物组分分布的均匀性,这也是烟气脱硝高效率的保证。因此,本研究不直接模拟氮氧化物与氨气在催化剂作用下的化学反应,而是将研究重点放在混合器及反应器的结构改进上,探讨引入导流板、整流栅及气流均布板等后对流场分布的影响规律。

2 数值计算

SCR 脱硝系统内的流动是复杂的三维非稳态流动,流动过程涉及气-液两相流动、湍流流动、传热传质、多组分输运及化学反应等过程。为便于模拟,需对复杂的流动过程进行适当简化并确保本研究中流场基本规律的真实性,忽略化学反应过程。本文取反应过程中某一准静态瞬间,将系统内的流动视为三维黏性不可压缩定常湍流流动,将烟气组分视为空气与氮氧化物的混合物,氨气入口为一定比例氨气与空气组成的混合气体,将喷氨栅格简化为 9 个圆形入口,均匀分布于混合器截面内,并保证质量流量不变。

2.1 数学模型及控制方程

简化后的稳态流动过程可以采用适当的数学模型进行描述,主要包括连续方程、动量方程、能量方

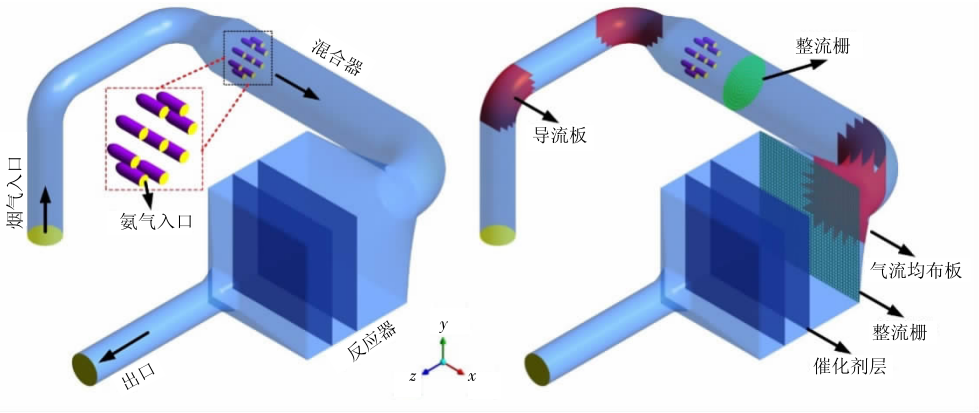


图 1 某分布式能源站 SCR 脱硝装置几何模型

Fig. 1 Geometric model of a distributed energy station SCR denitration device

程以及组分输运方程。由于流动过程为复杂的湍流流动,采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型封闭雷诺时均 (RANS) 方程组。

连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i$$
$$i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k_0}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_T \quad j = 1, 2, 3, \quad (3)$$

组分输运方程

$$\frac{\partial(\rho u_j \vartheta)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\vartheta \frac{\partial \vartheta}{\partial x_j} \right) + S_\vartheta \quad j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

式中: u_i, u_j 为速度张量; x_i, x_j 为坐标张量; μ 为动力黏度; ρ 为密度; p 为压力; F_i 为体积力源项; T 为温度; k_0 为流体传热系数; c_p 为比定压热容; S_T 为流体黏性耗散项; ϑ 为组分质量分数; Γ_ϑ 为广义扩散系数; S_ϑ 为广义源项。

标准的 $k-\varepsilon$ 双方程模型是个半经验半理论公式,是在理论推导的基础上通过总结试验结果而得出的,适用范围广、计算量小,精度上能较好地满足一般工程要求,在许多工业流场和热交换模拟中得到了成功的应用,其输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad j = 1, 2, 3, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad j = 1, 2, 3, \quad (6)$$

式中: μ_1 为湍流黏度; k 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; 其余参数参考文献[10]。

2.2 边界条件

边界条件及离散格式影响数值结果的准确性及精度,因此,要合理给定边界条件并选取适当的离散格式。

(1)采用分离式求解器对时均纳维-斯托克斯 (N-S) 方程组进行稳态数值计算。采用 SIMPLEC 算法对压力和速度进行耦合求解,该算法采取对压力与速度同步修正的方式来提高计算的收敛速度。

(2)选取标准 $k-\varepsilon$ 出流条件、无滑移壁面条件及绝热条件。

(3)进口边界条件选取速度进口,认为速度在

进口断面上均匀分布且沿断面法线方向指向流体内部,速度根据流量计算得到,具体数值见表 1;出口给定自由出流;壁面条件给定无滑移边界条件且绝热;催化剂层采用多孔跳跃模型,给定厚度及压降系数。

表 1 进口模拟参数				
Tab. 1 Simulation parameters at inlet				
项目	组成	质量分 数/%	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	温度/K
烟气入口	空气 + NO	$w(\text{NO}) = 0.25$	8.5	525
氨气入口	空气 + NH_3	$w(\text{NH}_3) = 45.00$	18.0	300

(4)使用压力插补 (PRESTO) 格式对压力项进行空间离散,对流项与扩散项分别采用二阶迎风格式。采用二阶迎风格式对湍动能及湍流耗散率进行空间离散。数值计算的收敛精度给定为 10^{-4} ,同时监测系统进出口断面质量流量与催化剂层速度及组分分布的不均匀度等数据,直到其数值稳定方可判断收敛。

进行湍流数值计算时还需给定进口速度的湍流边界,选用湍动度与水力直径模式,其中水力直径与进口管直径保持一致,而湍动度计算公式为

$$I = 0.16 Re^{-0.125}, \quad (7)$$

式中: I 为进口位置的湍动度; Re 为进口断面的平均雷诺数。

2.3 网格划分

网格生成采用 Meshing 软件来处理,考虑 SCR 脱硝系统结构的复杂性,全局采用非结构化网格生成;同时,为满足标准壁面函数对 y^+ 的要求,在结构相对复杂、流场梯度变化较大的区域及壁面附近区域采用网格加密技术。图 2 为脱硝系统装置的网格划分图,网格数量为 1 920 000,其中 A、B、C、D 分别代表了管道连接处弯道的导流板、反应器进口位置突扩结构内的气流均布板、方形整流栅与圆形整流栅,整流栅的开孔率为 30% ~ 35%。

3 结果与讨论

对该 SCR 脱硝装置内流场分布规律的数值研究主要包括 3 个阶段:第 1 阶段(方案 1):模拟特定工况下烟气与氨气在系统内的流动规律,系统中不包括任何导流板、整流栅及气流均布板等结构;第 2 阶段(方案 2):通过引入导流板及整流栅结构来改善脱硝装置内的流场分布;第 3 阶段(方案 3):引入气流均布板进一步改善反应器内流场的均匀性。具体模拟方案见表 2。

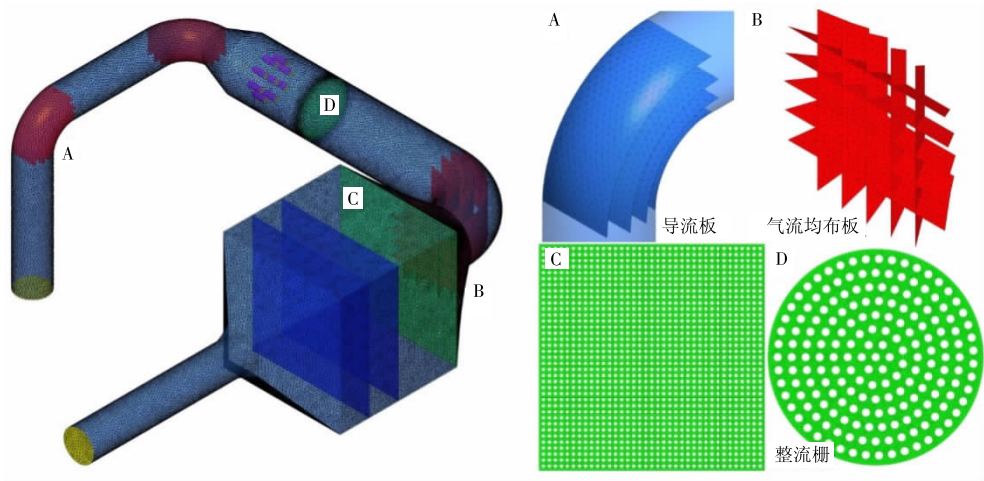


图 2 脱硝系统网格划分
Fig.2 Meshing of a denitration system

表 2 数值模拟方案
Tab.2 Numerical simulation scheme

方案	导流板	整流栅	气流均布板	模拟对象
1	无	无	无	流场分布规律
2	有	有	无	
3	有	有	有	

采用相对均方根 (RMS) 法来评价流场中气流分布的均匀性,其判定公式为

$$\sigma_{\zeta} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\zeta_i - \bar{\zeta}}{\bar{\zeta}} \right)^2} \times 100\% , \quad (8)$$

式中: ζ 为某物理量,可以是速度、质量分数、温度等; $\bar{\zeta}$ 为相应物理量的平均值。

$\sigma < 0.25$ 时气流分布为合格, $\sigma < 0.20$ 时气流分布为良好, $\sigma < 0.15$ 时气流分布为优秀。

为方便结果的分析与讨论,图 3 给出了脱硝装置中不同截面的位置,其中截面 S_x 代表进气管道沿 x 方向的中间截面,截面 S_y 代表混合器与反应器沿 y 方向的中间截面,而 S_{p1} 截面与 S_{p2} 截面则是反应器中第 1 层催化剂与第 2 层催化剂所在位置。

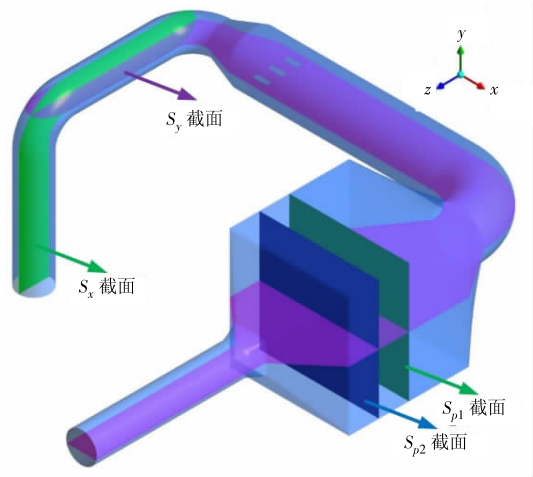


图 3 不同截面位置示意
Fig.3 Positions of different cross sections

3.1 3 种方案下内流场对比分析

为有效对比改进方案下 SCR 脱硝装置内流场的分布情况,图 4 ~ 图 6 分别给出了不同改进方案下 S_y 截面内速度、NO 质量分数及温度分布的对比云图。为便于观察,所有结果均在同一标尺下给定,

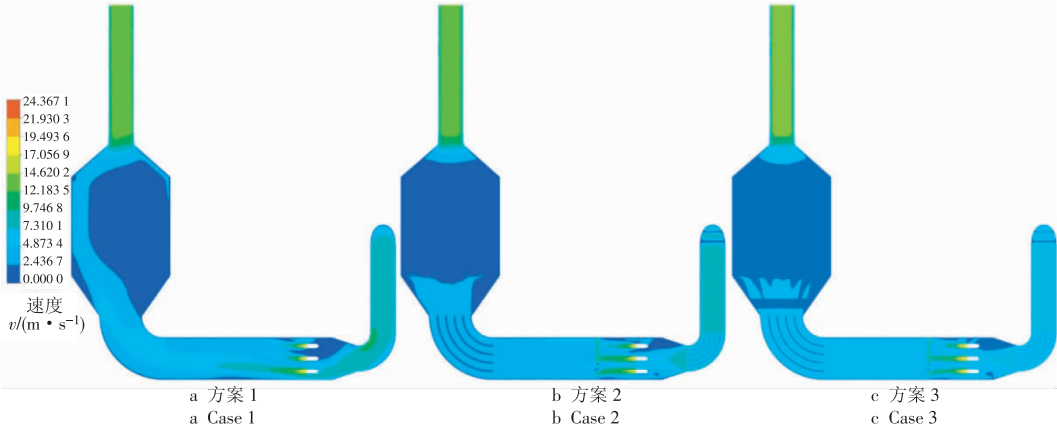


图 4 不同方案下 S_y 截面处速度分布对比
Fig.4 Comparison of velocity distribution at cross section S_y under different schemes

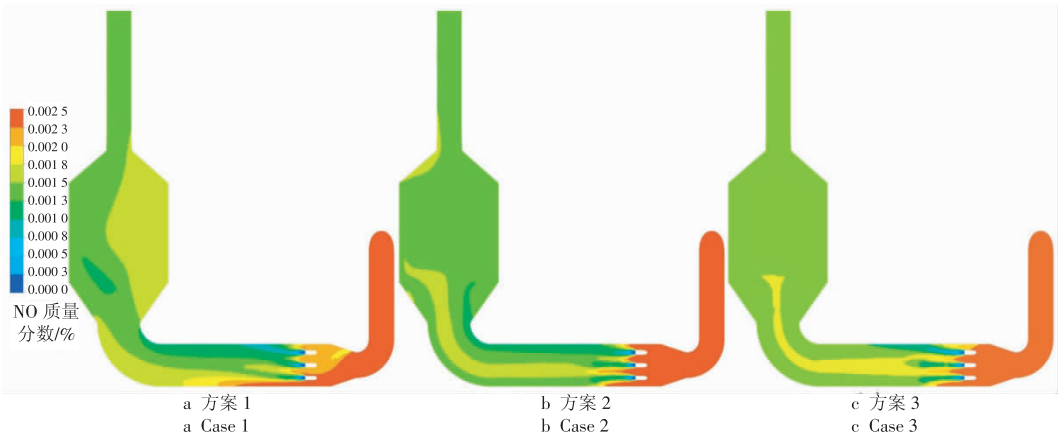


图 5 不同方案下 S_y 截面处 NO 分布对比

Fig. 5 Comparison of NO distribution at cross section S_y under different schemes

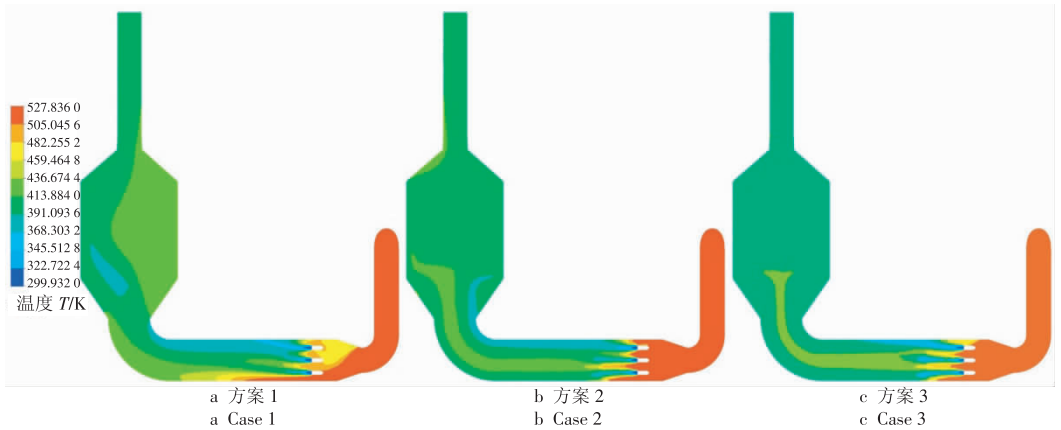


图 6 不同方案下 S_y 截面处温度分布对比

Fig. 6 Comparison of temperature distribution at cross section S_y under different schemes

保证了云图中颜色的一致性。

从图中可以看出:相比于方案 1,加装导流板和整流栅可有效改善脱硝装置内的流场分布,流场内的速度场变得更加均匀,流体经过弯道后的流动分离现象被显著弱化;同时,混合器与反应器内整流栅的引入促进了烟气与氨气的掺混,使得混合器及反应器内 NO 分布更加均匀,温度场分布也更加均匀。相比于方案 2,方案 3 引入了气流均布板,显著改善了反应器内流场分布,经过气流均布板的流体速度变得更加均匀,改善了 NO 组分分布及温度分布规律,使其在反应器外侧不均匀分布现象显著削弱。因此,通过引入导流板与整流栅装置可有效改善脱硝装置内的流场分布,保证了反应器内化学反应的有效进行。

3.2 不同方案不均匀性统计分析

对于 SCR 脱硝系统,真正决定其脱硝效率的是反应器内氮氧化物与氨气进行化学反应的速率与程度,化学反应进行得越强烈,脱硝越彻底。因而,反应器内催化剂层的流场分布显得尤为重要,催化剂层入口处的速度分布、反应物组分分布及温度分布

决定了化学反应的速率。图 7 ~ 图 9 给出了不同方案下第 1 层催化剂入口截面 S_{p1} 处的速度分布及反应物的组分分布云图。

从图中可以看出,导流板及整流栅的加入改善了 S_{p1} 截面处的流场分布,且气流均布板的引入进一步强化了该截面处流场分布的均匀性。从速度分布云图可以看出,相比于方案 1,方案 2 内局部高速流动区域消失,流场呈现圆环状分布,直到方案 3 出现了较规则的圆环形状,且边角位置的速度分布更加均匀,平均速度仅为 1.63 m/s。从反应物的组分分布云图可以看出,改进后的方案中,NO 与 NH_3 质量分数分布局部较高与较低区域都在大幅度减小,且整体上分布较均匀。相同的结果从表 3、表 4 中可以得到较明显的反馈: S_{p1} 截面内平均速度从 3.18 m/s 降至 1.63 m/s,速度不均匀系数从 28.39% 减小到 20.81%,气流分布合格。从温度及组分分布的结果看,加装气流均布板后,温度、NO 质量分数及 NH_3 质量分数的不均匀系数出现明显下降,方案 3 中其不均匀分布系数分别为 1.30%, 3.65%, 5.25%。类似的规律从表 4 的数据中亦可得到证实,

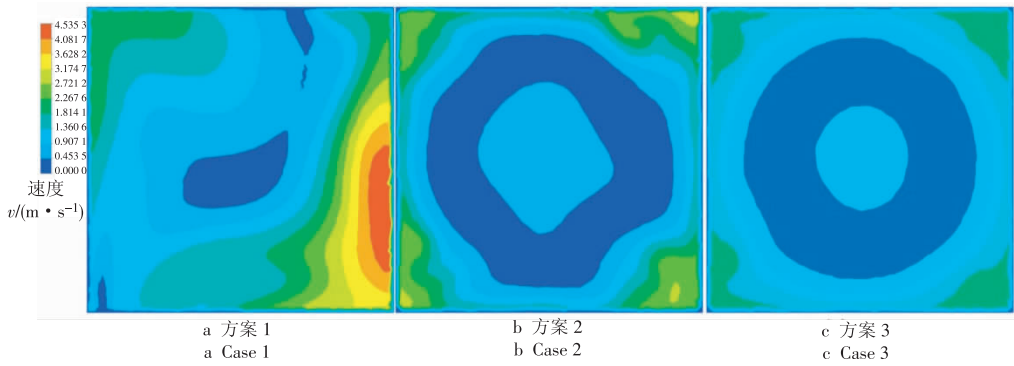


图 7 不同方案下 S_{p1} 截面处速度分布对比

Fig.7 Comparison of velocity distribution at cross section S_{p1} under different schemes

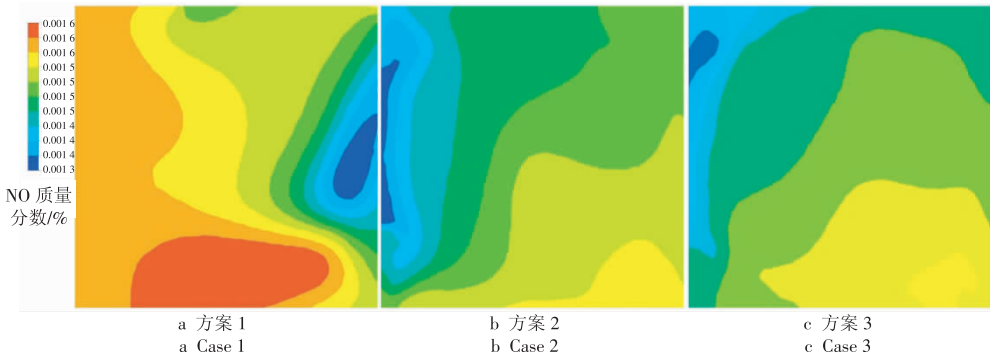


图 8 不同方案下 S_{p1} 截面处 NO 分布对比

Fig.8 Comparison of NO distribution at cross section S_{p1} under different schemes

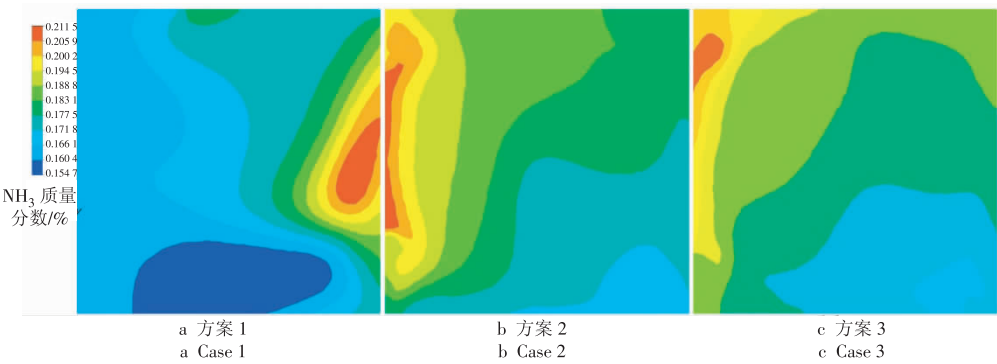


图 9 不同方案下 S_{p1} 截面处 NH_3 分布对比

Fig.9 Comparison of NH_3 distribution at cross section S_{p1} under different schemes

表 3 S_{p1} 截面不同参数的不均匀度

Tab.3 Nonuniformity of different parameters of cross section S_{p1}

方案	速度		温度		NO		NH ₃	
	$v_{\text{avr}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\sigma_v/\%$	T_{avr}/K	$\sigma_T/\%$	$w(\text{NO})/\%$	σ_{NO}	$w(\text{NH}_3)/\%$	$\sigma_{\text{NH}_3}/\%$
1	3.18	28.39	409.1	2.76	1.47e-3	7.16	1.85e-1	10.29
2	2.01	23.55	408.9	1.59	1.47e-3	4.53	1.85e-1	6.51
3	1.63	20.81	408.9	1.30	1.47e-3	3.65	1.85e-1	5.25

表 4 S_{p2} 截面不同参数的不均匀度

Tab.4 Nonuniformity of different parameters of cross section S_{p2}

方案	速度		温度		NO		NH ₃	
	$v_{\text{avr}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\sigma_v/\%$	T_{avr}/K	$\sigma_T/\%$	$w(\text{NO})/\%$	σ_{NO}	$w(\text{NH}_3)/\%$	$\sigma_{\text{NH}_3}/\%$
1	2.77	30.47	408.8	2.32	1.47e-3	5.98	1.85e-1	8.56

续表

方案	速度		温度		NO		NH ₃	
	$v_{\text{avr}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\sigma_v/\%$	T_{avr}/K	$\sigma_T/\%$	$w(\text{NO})/\%$	σ_{NO}	$w(\text{NH}_3)/\%$	$\sigma_{\text{NH}_3}/\%$
2	1.68	32.08	408.9	1.49	1.47e-3	4.23	1.85e-1	6.08
3	1.34	26.82	408.9	1.25	1.47e-3	3.49	1.85e-1	5.02

虽然本次模拟并不参与化学反应,但 S_{p_z} 截面内流场的不均匀系数也能一定程度上反映该层内化学反应的程度。

本研究对燃气分布式 SCR 脱硝装置进行改进,引入了导流板、整流器及气流均布器,虽然改善了系统内的流场分布,使得流场内尤其是反应器催化剂入口截面内的速度分布及反应物组分分布得到明显改善,但数值结果表明,速度不均匀系数为合格,距离优秀仍有较大的改进空间,需要对各装置进行深入优化研究,方能保证较高的脱硝效率。

4 结论

本文针对某楼宇型分布式能源站拟建的 SCR 脱硝系统进行数值模拟研究,提出了 3 种不同的改进方案,获得了合理的脱硝装置改进措施,数值模拟结果表明,改进后的脱硝装置内的流场分布得到显著改善。研究中得到以下重要结论。

(1)导流板及整流栅可有效改善脱硝装置内流场分布,使得速度场、组分及温度场分布更加均匀;气流均布板强化了反应器内流场的均匀性。

(2)对比分析了脱硝装置内速度、NO、NH₃ 及温度等的分布规律,相比于原方案,改进之后的脱硝装置在第 1 层催化剂层速度、NO 及 NH₃ 分布的均匀度提高明显,其中速度不均匀系数为 20.81%,气流分布合格。数值研究结果可为燃气分布式能源系统脱硝提供参考,同时也可为系统装置后期深入结构优化奠定基础。

参考文献:

[1]宋伟明.我国天然气分布式能源的发展现状及趋势[J].中国能源,2016,38(10):41-45.

[2]陈飞.中国天然气分布式能源发展现状及建议[J].石油石化节能,2016,6(12):59-62.

[3]曲顺利.天然气分布式能源应用现状及发展前景[J].煤炭与化工,2017,40(2):10-12.

[4]陈志锋.燃气内燃机三联供系统烟气脱硝技术分析[J].华电技术,2017,39(1):71-72.

[5]郭甲生,李巡案,徐振华,等.天然气分布式能源系统烟气脱硝方案[J].煤气与热力,2014,34(6):13-15.

[6]侯建鹏.SCR 法烟气脱硝系统数值模拟研究[D].西安:西安理工大学,2008.

[7]韩发年,闫志勇.SCR 烟气脱硝工艺喷氨混合装置研究进展[J].化工进展,2015,34(12):4151-4157.

[8]STREIFF F, FLEISCHLI M. Static mixing element having deflectors and a mixing device: US, Re. 36969[P]. 2000-11-28[2018-09-27].

[9]潘伶,杨沛山,曹友洪. SCR 脱硝反应器烟道内部流场的数值模拟与优化[J].环境工程学报,2015,9(6):2918-2924.

[10]王福军.计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

江婷(1991—),女,安徽霍山人,工程师,经济师,工学硕士,从事天然气分布式能源系统集成优化工作(E-mail:jiangt@chec.com.cn)。

广 告 索 引

江苏火电电力设备制造有限公司	(封面)	华电郑州机械设计研究院有限公司(跨版)	… (前插 6,7)
扶贫扶智(公益广告)	(封二)	郑州科源耐磨防腐工程有限公司(跨版)	… (前插 8,9)
郑州科润机电工程有限公司	(封三)	华电重工股份有限公司(跨版)	… (前插 10,11)
南通高欣耐磨科技股份有限公司	(封底)	华电重工股份有限公司	(目次页右)
深圳鹏锐智合科技有限公司	(前插 1)	江苏环球龙圣科技发展有限公司	(中插 1)
南京三埃工控有限公司	(前插 2)	华电水务控股有限公司(跨版)	… (中插 2,3)
天津市洪浩保温管有限公司	(前插 3)	华电环保系统工程有限公司(跨版)	… (中插 4,5)
浙江浙能催化剂技术有限公司	(前插 4)	上纬新材料科技股份有限公司	(中插 6)
中国电建集团上海能源装备有限公司	(前插 5)		