

柴油机尿素 SCR 系统喷雾碰壁数值模拟

Modeling of Urea Spray Impingement for Diesel SCR System

华伦, 唐韬, 赵彦光, 帅石金*

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

Lun Hua, Tao Tang, Yanguang Zhao, Shijin Shuai

State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

摘要: 本文耦合排气流动建立了无空气辅助式 SCR 系统尿素水溶液的喷射、雾化、蒸发和碰壁过程的 CFD 模型, 并通过试验对模型进行可靠性验证。在此基础上, 对比研究喷嘴弯管肘部喷射和直管壁面喷射两种情况随排气流速、排气温度、管径和喷射角度等变化的单位时间尿素碰壁质量 (Q_{wall})。研究发现对肘部喷射的情况, 当排气流速较低时, Q_{wall} 随排气流速的增大明显增大; 相比肘部喷射, 壁面喷射时 Q_{wall} 较小, 且更有利于尿素分解。

关键词: 柴油机; 尿素 SCR; 计算流体力学

Abstract: CFD model of urea spray impingement which is coupled spray injection, droplet atomization, evaporation and gas flow was established for airless injection system. The model was validated by experiments. Based on the established model, the mass rate of urea water solution at exhaust inner wall (Q_{wall}) was investigated with the variation of flow velocity, temperature, pipe diameter and spray angle for two typical injection positions which are at the elbow and pipe wall of exhaust pipes. It is found that Q_{wall} increased with the increase of gas flow velocity, but Q_{wall} is almost constant with continue increasing of velocity. Q_{wall} is lower for spray injection position at pipe wall than elbow.

Keywords: Diesel engine, Urea-SCR, Deposit, Urea spray, CFD

1 引言

面对日益严重的排放污染问题和严格的汽车尾气排放法规, 对缸内生成的 NO_x 采用机外后处理措施越来越受到人们的重视。尿素选择催化还原 (Urea-SCR) 技术是目前降低柴油机 NO_x 排放最有效的后处理技术之一, 采用 SCR 技术可以使柴油机在满足严格排放法规的同时, 仍具有较好的燃油经济性。

在尿素 SCR 系统中会发生复杂的物理和化学变化, 包括尿素水溶液喷雾雾化和蒸发; 尿素的热解和异氰酸的水解; NO_x 在催化剂表面与氨气发生的表面催化反应等。其中尿素水溶液的喷雾特性直接影响尿素的分解及其与排气的混合, 从而影响 NO_x 的转化效率。Felix 等^{[1][2]}和 Yong^[3]应用计算流体力学 (CFD) 软件对尿素水溶液在排气管道内的喷雾特性、碰

壁现象、氨分布和混合气进行了数值模拟。Jeong 等人^[4]对尿素 SCR 的喷雾及流动的数学模型进行了详细阐述，并通过数值模拟结果提出了优化方案。Henrik 等人^[5]对 SCR 尿素喷雾 CFD 模拟的数学模型进行了详细分析。国内的王谦等人^[6]、帅石金^[7]和张文娟^[8]等人对尿素喷雾特性及 SCR 系统进行了数值模拟研究。针对尿素喷雾特性的试验研究，华伦等^[9]通过 PDA 试验和可视化试验对空气辅助和无空气辅助喷射系统喷雾的粒径、液滴速度、贯穿距和锥角等进行了试验研究；Wang 等^[10]对尿素喷雾液滴的蒸发过程进行的可视化试验研究。

无空气辅助喷射系统喷嘴的安装位置通常在排气管弯管肘部和壁面，但是无论何种安装位置都应该尽量避免或减少尿素溶液的碰壁量，因为碰壁量越多，在管壁上可能残留的尿素就越多，从而在一定条件下形成沉积物，进而影响 NO_x 转化效率和 SCR 催化转化器的使用寿命。本文以 32.5% 尿素水溶液为模拟液，耦合排气流动建立了 SCR 系统中尿素水溶液的喷射、雾化、蒸发和碰壁等过程的 CFD 模型，并通过可视化试验、PDA 试验和台架试验对模型进行可靠性验证。在此基础上，通过改变排气流速、排气温度、管径和喷射角度等对尿素碰壁质量进行了数值模拟，为减少沉积物的生成，提高 NO_x 转化效率提供理论依据和优化方案。

2. 试验部分

为了对 CFD 模型进行可靠性验证，首先对喷雾形态和液滴速度进行了可视化试验和相位多普勒分析 (PDA) 试验，并在发动机台架上应用热电偶和红外光谱分析 (FTIR) 对壁面温度和尿素分解产物 NH_3 进行测量分析。

为了获得无空气辅助式系统尿素喷雾形态，对喷雾进行可视化试验，喷嘴示意图如图 1 所示。试验中高速摄像机采用了日本 PHOTRON 公司的高速 CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 摄像机，拍摄速率为 500 帧/秒，试验条件为常温常压。PDA 试验中，在确定了实验测量中所采取的光路模式和尿素喷雾中的测量位置与测量体后，喷雾液滴穿过测量体，产生多普勒触发信号。光探测接收镜头接收到与液滴速度成线性关系的多普勒信号，获得尿素喷雾液滴的速度。

图 2 为与发动机出口相连的管路和其上布置的喷嘴、热电偶、法兰、FTIR 采样点等的照片和示意图。本研究采用的是 Bosch 公司生产的无空气辅助式尿素喷射系统，使用三个热电偶分别测量排气温度和喷嘴后上下表面的壁面温度。



图 1 无空气辅助喷嘴示意图

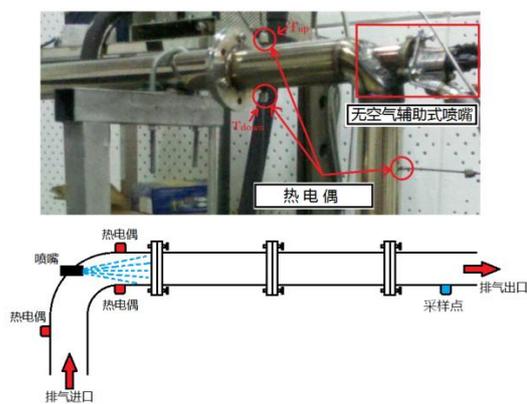


图 2 试验管路及其上布置的喷嘴和测量点

3. 模拟部分

3.1 数学模型

非定常可压缩流体的质量守恒、动量守恒、能量守恒和组分守恒的雷诺平均控制体方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] - S_\phi$$

可由下式表示（对公式具体的表示见表 1）：

针对扩散相，即喷雾液滴的模拟，采用拉格朗日方法，控制方程为：

$$m_d \frac{du_d}{dt} = F_{dr} + F_p + F_b + F_{am}$$

$$\frac{dx_d}{dt} = u_d$$

其中 F_{dr} 是阻力, F_p 是压力, F_b 和 F_{am} 分别是体力和虚拟质量力。尿素喷雾模型和液滴破碎模型采用 Reitz-Diwakar 模型，碰壁模型采用 Bai-Gosman 模型。

表 1 控制方程的详细表示

ϕ	D_ϕ	S_ϕ
1	0	S_m
u_i ($i = 1, 2, \dots, N$)	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + S_{v_i}$ $\overline{\rho u'_i u'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \delta_{ij}$ $k = \frac{\overline{u'^2}}{2}, \mu_t = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\epsilon}$
h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	$-u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + S_h$
Y	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_f}$	S_c

3.2 边界条件

表 2 为 Bosch 无空气辅助喷射系统喷嘴的几何参数，对应的示意图如图 1 所示。本文以实际中应用的 32.5% 尿素水溶液为模拟液进行数值模拟。

表 2 Bosch 无空气辅助喷射系统喷嘴的几何参数

喷孔数目	N=3
喷孔直径	$D_h=0.19\text{mm}$
喷孔中心之间距离	1.9mm
喷孔在圆周上布置的角度	120°
可视化的喷雾锥角	$\alpha=23^\circ$
每束喷雾的喷雾锥角	$\beta=9^\circ$
两束喷雾之间的夹角	$\gamma=12^\circ$

最大喷射速率	2g/s
--------	------

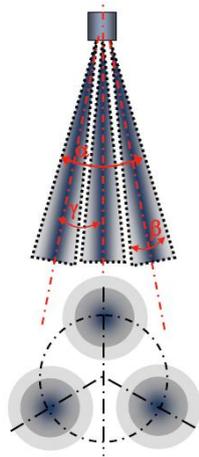


图 3 喷嘴结构示意图

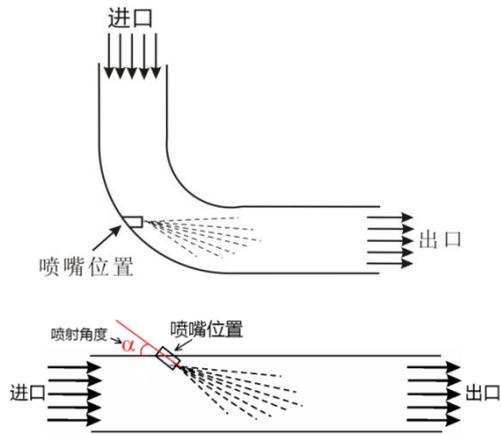


图 4 喷嘴在不同位置喷射的示意图：
(上) 肘部喷射，(下) 壁面喷射

如图 4 所示，喷嘴的安装位置通常在排气歧管肘部（简称肘部(a)）和排气歧管管壁（简称壁面(b)）。本文以建立的 CFD 模型为基础，通过改变排气温度、排气流速、管径分别对肘部喷射的单位时间尿素碰壁质量 (Q_{wall}) 进行研究；通过改变排气流速和喷射角度对壁面喷射的 Q_{wall} 进行研究。除此之外，还对比研究了两种喷射位置的 Q_{wall} 。

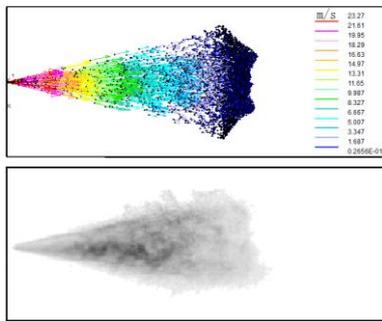


图 5 数值模拟得到的喷雾形态（上）与高速摄影得到的喷雾形态（下）的对比

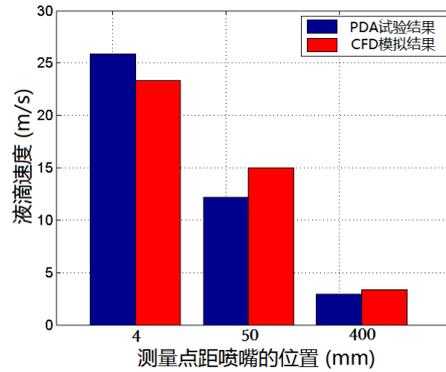


图 6 数值模拟结果与 PDA 试验获得的喷雾粒径速度对比

3.3 模型验证

如图 5 所示，为在同一时刻，相同喷射速率下，数值模拟与可视化试验得到的喷雾形态对比，可以看到模拟结果与试验结果吻合很好。图 6 为距喷嘴不同位置处 PDA 试验获得的液滴速度与模拟结果进行了的对比，发现吻合的较好。为了通过台架试验验证模型的可靠性，首先建立与试验条件和排气歧管结构相同的 CFD 模型（如图 7 所示）。其次，找到与试验对应位置的壁面温度测量点（如图 2 所示），并进行对比。对比结果如图 8 所示，排气温度改变时，通过热电偶获得的壁面温度与数值模拟获得的壁面温度吻合的很好。通过以上试验与模拟对比，验证了尿素喷雾碰壁模型的可靠性。

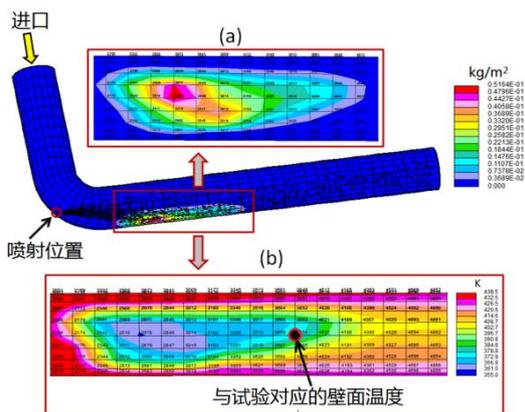


图 7 数值模拟结果获得的壁面温度

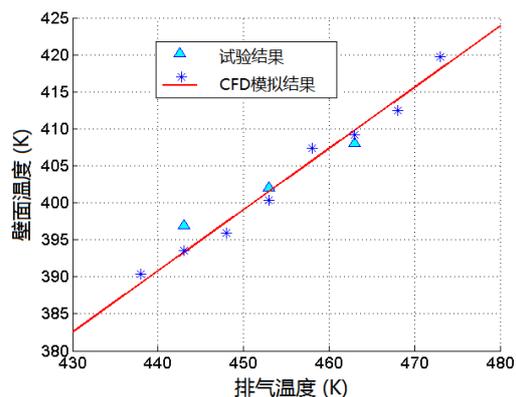


图 8 不同排气温度下获得的试验与模拟壁面温度

3.4 模拟结果与分析

图 9 为尿素喷雾肘部喷射时，不同温度下随排气流速改变的单位时间尿素碰壁质量 (Q_{wall})。模型采用的排气管管径为 63mm，尿素喷射量为 0.1g/s。排气流速较低时， Q_{wall} 随着排气流速的增大明显增大，当排气流速大于 30m/s 时， Q_{wall} 变化不明显。图 10 为应用 FTIR 在台架试验上获得的尿素分解产物 NH_3 的浓度，排气流速较低时（即 Q_{wall} 较低时）， NH_3 浓度较高，当流速达到 30m/s 和 50m/s 时（即 Q_{wall} 较高时）， NH_3 浓度较低。由此可以定性的说明数值模拟获得的 Q_{wall} 反映出尿素在排气管中的分解量。随着温度的变化 Q_{wall} 变化不明显，这主要是因为温度较低时，尿素水溶液中的尿素在喷嘴到壁面这一极短的时间内，并不能快速分解，而水的饱和蒸气压在 200℃ 时很高，会迅速蒸发。

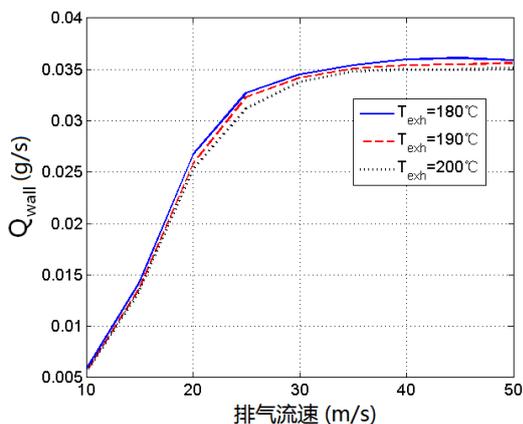


图 9 不同温度下随排气流速改变的单位时间尿素碰壁质量

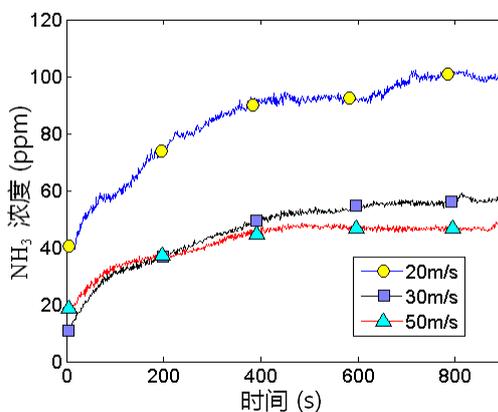


图 10 尿素喷雾肘部喷射时随排气流速改变的 NH_3 浓度

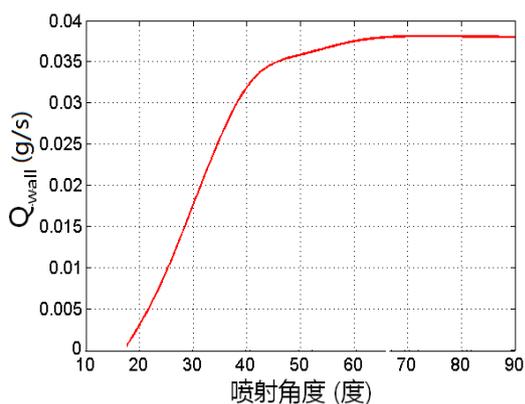
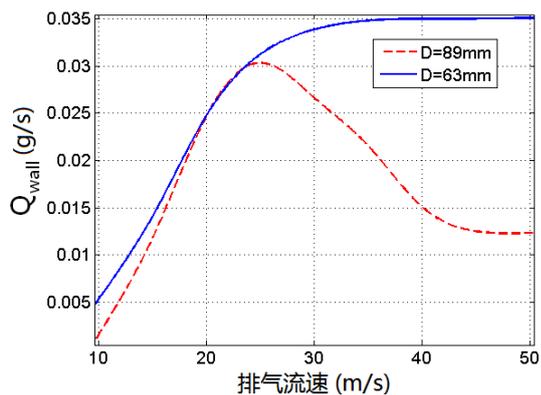


图 11 不同管径随排气流速改变的单位时间尿素碰壁质量

图 12 随喷射角度变化的单位时间尿素碰壁质量

图 11 为相同温度下，肘部喷射时不同管径随排气流速变化的 Q_{wall} 。对于较大的管径，当排气流速较低时， Q_{wall} 相差较小，但是当流速较高时，管径越小， Q_{wall} 越大。

图 12 和图 13 是喷嘴壁面喷射时，随喷射角度变化的 Q_{wall} （参照图 4 (b)），角度越小， Q_{wall} 越小，当大于 60° 时， Q_{wall} 随喷射角度的变化不明显。但是，受喷嘴安装条件的限制，喷射角度不能过小，本试验中采用 30° 进行尿素喷射。

图 11 为相同温度下，肘部喷射时不同

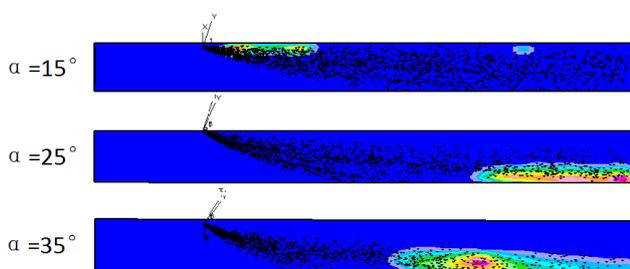


图 13 随喷射角度变化的间尿素碰壁质量

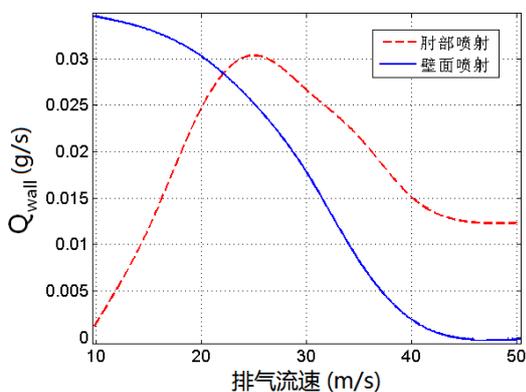


图 14 不同喷射位置的单位时间尿素碰壁质量

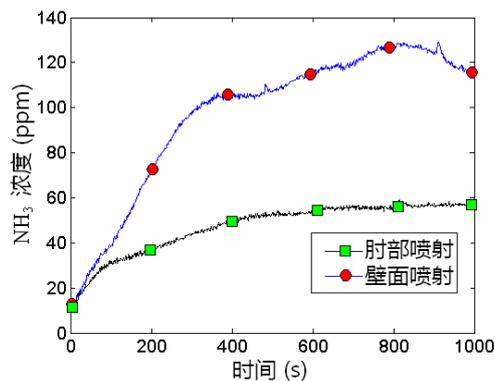


图 15 不同喷射位置的 NH_3 浓度

图 14 为喷射位置不同时随排气流速变化的 Q_{wall} ，在排气温度一定的情况下， 30° 壁面喷射时， Q_{wall} 随排气流速的增大明显减小，且流速达到 50m/s 时， Q_{wall} 接近零。与肘部喷射的情况相比，壁面喷射在流速较低时 Q_{wall} 较大，而流速达到 25m/s 后， Q_{wall} 较小。图 15 是应用 FTIR 在台架试验上获得的不同喷射位置尿素分解产物 NH_3 的浓度，排气流速为 30m/s ，采用壁面喷射时（即 Q_{wall} 较小时） NH_3 较大，说明尿素分解更加完全，这也就说明，相比肘部喷射，壁面喷射更有利于尿素分解。由此再次定性的说明数值模拟获得的 Q_{wall} 反映出了尿素在排气管中的分解量。

4. 结论

本文耦合排气流动建立了无空气辅助式 SCR 系统尿素水溶液的喷射、雾化、蒸发和碰壁过程的 CFD 模型, 并通过可视化试验, PDA 试验和台架试验对模型进行可靠性验证。在此基础上, 对比研究喷嘴肘部喷射和壁面喷射随排气流速、排气温度、管径和喷射角度变化的单位时间尿素碰壁质量 (Q_{wall}), 主要结论有:

(1) 对于喷嘴肘部喷射的情况, 当排气流速较低时, Q_{wall} 随着排气流速的增大明显增大, 当排气流速较大时, Q_{wall} 变化不明显。随着温度的变化, Q_{wall} 变化不明显。管径越小, Q_{wall} 越大;

(2) 采用喷嘴壁面喷射时, 喷射角度越小, Q_{wall} 越小, 当大于 60° 时 Q_{wall} 随喷射角度的变化不明显;

(3) 相比肘部喷射, 壁面喷射时的 Q_{wall} 较小, NH_3 浓度较大, 更有利于尿素分解。

5 参考文献

- [1] Felix Birkhold, Ulrich Meingast, Peter Wassermann. Modeling and simulation of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNOx-systems. Applied Catalysis B: Environmental. 2007,70:119–127.
- [2] Felix Birkhold, Ulrich Meingast, Peter Wassermann. Analysis of the Injection of Urea-Water-Solution for Automotive SCR DeNOx-Systems Modeling of Two-Phase Flow and SprayWall-Interaction. SAE paper: 2006-01-0643.
- [3] Yong, Development of a 3D Numerical Model for Predicting Spray, Urea Decomposition and Mixing in SCR Systems, SAE paper: 2007-01-3985
- [4] Soo-Jin Jeong, Sang-Jin Lee, and Woo-Seung Kim, Numerical study on the optimum injection of urea-water solution for SCR DeNOx system of a heavy-duty diesel engine to improve DeNOx performance and reduce NH_3 slip, Environmental Engineering Science, 2008, 25: 1017—1035
- [5] Henrik Ström, Andreas Lundström, Bengt Andersson. Choice of urea-spray models in CFD simulations of urea-SCR systems. Chemical Engineering Journal 2009,150:69–82.
- [6] 王谦, 刘倩, 罗晶, 何志霞, 刘庆, 徐飞. 柴油机 Urea-SCR 排气管路 CFD 优化与 NO_x 排放分析. 内燃机学报. 2009,27(6):523-528.
- [7] 帅石金, 张文娟, 董红义, 王建昕, 王志. 柴油机尿素 SCR 催化剂优化设计. 车用发动机. 2007,167(1):44-47.
- [8] 张文娟, 帅石金, 董红义, 王志, 王建昕. 尿素 SCR- NO_x 催化剂流动、还原剂喷雾及表面化学反应三维数值模拟. 内燃机学报. 2007,25(5):433-438.
- [9] Lun Hua, Yanguang Zhao, Jing Hu, Tao Tang, Shijin Shuai, Comparison between Air-assisted

- and Airless Urea Spray for Diesel SCR System by PDA and CFD. SAE paper:2012-01-1081
- [10]Tae Joong Wang, Seung Wook Baek, and Seung Yeol Lee, Experimental Investigation on Evaporation of Urea-Water-Solution Droplet for SCR Applications, Journal of American Institute of Chemical Engineers, 2009 Vol. 55(12):3267-3276.