

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.041

柴油机 SCR 系统尿素分解效率研究*

马军彦 李君 曲大为 撒占才 刘少华

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022)

摘要: 提出柴油机 SCR 系统尿素分解效率的理论计算方法。试验研究了柴油机 SCR 系统尿素分解效率、 NO_x 转化效率以及 NH_3 泄漏量的关系, 分析了空速、氨氮比、SCR 温度对三者的影响。结果表明, NO_x 的转化效率与尿素分解效率的变化趋势基本相同; 在催化剂活性温度范围内, 尿素水溶液最终分解出 NH_3 的效率都在 90% 以上; 随空速的增大, 尿素分解效率先增大再减小; 氨氮比为 1 时, NO_x 的转化效率较高, 但是 NH_3 的泄漏量超出限值; 氨氮比对尿素分解效率几乎没有影响; 排气温度上升时, 尿素分解效率增大。空速和 SCR 温度是影响尿素分解效率的最大因素。提出的计算方法能够呈现尿素分解效率的变化趋势, 为提高 SCR 系统工作效率提供了依据。

关键词: 柴油机 选择性催化还原 尿素 分解效率 影响因素

中图分类号: TK421+.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)06-0282-05

Urea Decomposition Efficiency of Diesel Engine SCR System

Ma Junyan Li Jun Qu Dawei Sa Zhancai Liu Shaohua

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to perfect the work efficiency evaluation system of diesel SCR system and improve the work efficiency of SCR system, the theoretical urea decomposition efficiency calculation method of diesel engine SCR system was proposed. The urea decomposition efficiency, amount of leakage of NH_3 and NO_x conversion efficiency of SCR system for diesel engine were investigated on an engine test bench, the influence of space velocity, NH_3/NO ratio and SCR temperatures were analyzed. Experiment results showed that the changing trend of NO_x conversion efficiency and urea decomposition efficiency was basically the same. In the catalyst activation temperature range, the urea decomposition efficiency was above 90%; with the increase of space velocity, the urea decomposition efficiency was increased first and then decreased. NH_3/NO ratio was 1 with high NO_x conversion efficiency, but the amount of leakage of NH_3 was exceeded the limit value. NH_3/NO ratio had little effect on the urea decomposition efficiency, and it was increased with the amount of leakage of NH_3 increasing. When the exhaust gas temperature was raised, the urea decomposition efficiency increased. The space velocity and exhaust gas temperature were the most important factors influencing the urea decomposition efficiency, the level of urea decomposition efficiency was the comprehensive effect of both. Through the study on the factors affecting the decomposition efficiency of urea, to reduce the deposition of urea in the exhaust pipe and improve the removal efficiency of NO_x . The proposed calculation method can exhibit a trend of urea decomposition efficiency and provide a basis for improving the work efficiency of SCR system.

Key words: Diesel engine Selective catalytic reduction Urea Decomposition efficiency Influencing factors

收稿日期: 2014-09-19 修回日期: 2014-10-11

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA111704)和国家自然科学基金资助项目(51306070)

作者简介: 马军彦, 博士生, 主要从事柴油机排放控制研究, E-mail: junyanm@163.com

通讯作者: 曲大为, 讲师, 博士, 主要从事发动机电子控制研究, E-mail: eewang404@163.com

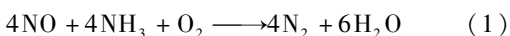
引言

利用尿素的选择性催化还原(SCR)后处理系统由于其技术比较成熟,还原效率高,已经广泛应用于电厂和柴油机的 NO_x 脱除, NO_x 的转化效率可达85%~90%^[1]。影响尿素SCR系统转化效率的因素主要包括喷嘴形式、喷射方向、喷射压力、催化剂性能、反应温度、 NH_3/NO_x 摩尔比等^[2-3]。有关柴油机SCR系统的尿素沉积物成因、沉积物主要成分、氨分布国内外都有较多研究。认为尿素加热速率慢^[4],排气温度较低、尿素喷射量太大^[5-6]等因素是形成沉积物的主要原因,形成的沉积物主要是未分解的尿素、缩二脲和三聚氰酸的混合物^[7]。虽然尿素沉积物的研究比较全面,但是并未给出尿素分解效率的计算方法,也很难确定尿素的转化效率。对于特定的催化剂,排气温度、氨氮比、空速是影响 NO_x 脱除效率的关键因素^[8-10],这些因素也对尿素分解出 NH_3 的效率(也即尿素的分解效率)至关重要^[11-12],尿素的分解效率又与 NO_x 的转化效率密切相关。本文通过理论分析,得出尿素分解效率的理论计算方法。通过台架试验和理论分析,研究在稳态条件下,空速、SCR平均温度、氨氮比对尿素分解效率及 NO_x 转化效率的影响,主要关注尿素水溶液通过SCR催化剂后最终能分解出 NH_3 的比例和 NO_x 的脱除效率,分析尿素分解效率与 NO_x 转化效率的关系,避免在SCR催化剂前气体采样不均匀而难以对尿素转化率做出评价,利用尿素分解出 NH_3 的效率可推测形成沉积物的比例,为优化SCR系统工作效率提供理论依据。

1 尿素分解效率的计算及试验方法

1.1 尿素分解效率的理论分析

柴油机排气中的 NO_x ,90%以上为 NO ,标准反应占主导地位,认为 NH_3 和 NO_x 反应系数为1:1,即 NO_x 的还原反应为^[3]



1 mol的尿素完全分解可得2 mol的 NH_3 ,尿素水溶液的质量分数为32.5%。SCR控制策略中,确定尿素水溶液的喷射质量如下:

发动机排气中 NO_x 的质量流量为

$$Q_{\text{NO}_x} = \frac{M_{\text{NO}_x}}{M_{\text{EG}}} Q_{\text{EG}} V_{\text{NO}_x, \text{up}} \times 10^{-6} \quad (2)$$

按照一定的氨氮比 Q_{NSR} 还原上述 NO_x 所需 NH_3 的质量流量为

$$Q_{\text{NH}_3} = f_s f_a \frac{M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{NO}_x}} Q_{\text{NO}_x} Q_{\text{NSR}} \quad (3)$$

需喷射尿素水溶液的质量流量为

$$Q_{\text{Adblue}} = \frac{1}{2} \frac{M_{\text{Adblue}}}{M_{\text{NH}_3}} \frac{Q_{\text{NH}_3}}{0.325} \quad (4)$$

式中 Q_{EG} ——排气质量流量,kg/h

$V_{\text{NO}_x, \text{up}}$ ——SCR催化剂上游 NO_x 的体积分数

Q_{NSR} ——设定的氨氮比,完全还原时为1

M_{NO_x} 、 M_{EG} 、 M_{NH_3} 、 M_{Adblue} —— NO_x 、排气、 NH_3 和尿素的摩尔质量,g/mol,排气、尿素摩尔质量分别为29、60 g/mol

f_s —— NH_3 和 NO_x 的反应系数,取值为1

f_a ——各类修正系数,稳态工况时可简化为1

将式(2)、(3)代入式(4)可得所需尿素水溶液的质量流量

$$Q_{\text{Adblue}} = \frac{1}{2} \frac{M_{\text{Adblue}}}{M_{\text{NH}_3}} \frac{Q_{\text{NH}_3}}{0.325} = 3.18 Q_{\text{NSR}} Q_{\text{EG}} V_{\text{NO}_x, \text{up}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

NO_x 的转化效率定义为

$$\eta_{\text{NO}_x} = \frac{V_{\text{NO}_x, \text{up}} - V_{\text{NO}_x, \text{down}}}{V_{\text{NO}_x, \text{up}}} \times 100\% \quad (6)$$

尿素分解效率定义为

$$\eta_{\text{Adblue}} = \frac{Q'_{\text{Adblue}} + Q_{\text{NH}_3, \text{slip}}^{\text{ad}}}{Q_{\text{Adblue}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中 $V_{\text{NO}_x, \text{down}}$ ——SCR催化剂下游 NO_x 体积分数

Q'_{Adblue} ——参与还原反应的 NH_3 对应的尿素水溶液质量

$Q_{\text{NH}_3, \text{slip}}^{\text{ad}}$ ——泄漏的 NH_3 对应的尿素水溶液质量

Q_{Adblue} 由分解出 NH_3 的尿素水溶液和未分解出 NH_3 的尿素水溶液两部分组成。分解出的 NH_3 又可分为参与还原反应的 NH_3 和泄漏的 NH_3 ,由这两部分 NH_3 即可计算出对应的两部分尿素水溶液,在发动机稳态运行工况下,可以简化地认为尿素的即时喷射量就是理论需求量,因此可以根据催化剂上下游 NO_x 的减少量($V_{\text{NO}_x, \text{up}} - V_{\text{NO}_x, \text{down}}$),代入式(5)计算出 Q'_{Adblue} ,此时还原反应按式(1)进行,则 Q_{NSR} 恒为1,即

$$Q'_{\text{Adblue}} = 3.18 Q_{\text{EG}} (V_{\text{NO}_x, \text{up}} - V_{\text{NO}_x, \text{down}}) \times 10^{-6} \quad (8)$$

泄漏的 NH_3 的质量流量 $Q_{\text{NH}_3, \text{slip}}$ 的计算方法与排气中 NO_x 的计算方法相同,即

$$Q_{\text{NH}_3, \text{slip}} = \frac{M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{EG}}} Q_{\text{EG}} V_{\text{NH}_3} \times 10^{-6} \quad (9)$$

式中 V_{NH_3} ——排气中 NH_3 的体积分数

$Q_{\text{NH}_3, \text{slip}}$ 所对应的尿素水溶液的质量流量为

$$Q_{\text{NH}_3, \text{slip}}^{\text{ad}} = \frac{1}{2} \frac{M_{\text{Adblue}}}{M_{\text{NH}_3}} \frac{Q_{\text{NH}_3, \text{slip}}}{0.325} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)并简化可得

$$Q_{\text{NH}_3, \text{slip}}^{\text{ad}} = 3.18 Q_{\text{EG}} V_{\text{NH}_3} \times 10^{-6} \quad (11)$$

将式(5)、(8)、(11)代入式(7)并简化可得

$$\eta_{\text{Adblue}} = \frac{V_{\text{NO}_x, \text{up}} - V_{\text{NO}_x, \text{down}} + V_{\text{NH}_3}}{Q_{\text{NSR}} V_{\text{NO}_x, \text{up}}} \times 100\% \quad (12)$$

式(12)即为尿素分解效率在稳态工况下的理论计算表达式。由式(6)和式(12)可知,通过测量排气中的 NO_x 、 NH_3 含量就可以计算出 SCR 系统 NO_x 的转化效率和尿素分解效率,影响 NO_x 转化效率的因素也同样决定了尿素分解出 NH_3 的效率。通过计算尿素的分解效率,对 SCR 系统的工作效率评价更加全面,通过研究影响尿素分解效率的因素,可以优化 SCR 系统参数,提高 NO_x 的还原效率。

1.2 试验方法及及设备

改变发动机工况,研究不同空速、排气温度、氨氮比下 NO_x 转化效率和尿素分解出 NH_3 的效率特性。试验选择了覆盖催化剂活性温度范围的 SCR 平均温度及发动机转速,待发动机运行稳定后,记录排气流量、SCR 上下游温度和 NO_x 浓度,控制尿素喷射系统按照设定的氨氮比喷射尿素,空速为转化到标准状态下的值^[13]。当上下游 NO_x 浓度、 NH_3 浓度稳定时作为该工况下的气体浓度。

试验主要设备如图 1 所示。尿素水溶液供给系统从发动机 ECU 获取发动机运行工况,根据所对应的 NO_x 排放量及催化剂温度,通过计算机控制尿素水溶液供给系统按照指定的氨氮比喷射尿素^[14-15]。

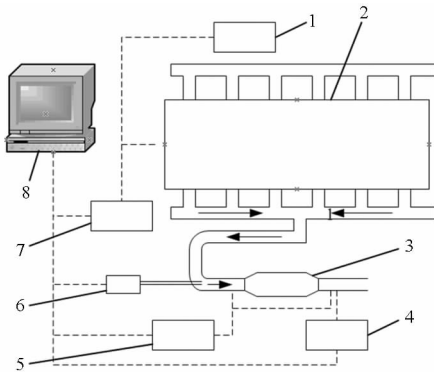


图 1 试验设备示意图

Fig. 1 Experimental apparatus

1. 发动机 ECU
2. 发动机
3. SCR 催化剂
4. SESAM FTIR
5. HORIBA MEXA-7500D
6. 尿素水溶液供给系统
7. INCA
8. 计算机

试验所用发动机及催化剂参数如表 1 所示。

为避免 SCR 系统中其他还原、氧化反应对测量参数的干扰,以及低排气温度时管路中的沉积物遇高温再分解对试验的干扰,试验参考 ESC 循环对发动机工况的设定,设置发动机工况如表 2 所示,使 SCR 进出口平均温度分布在钒基催化剂的活性温度

窗口。试验顺序从高排气温度至低排气温度。

表 1 发动机及催化剂参数

Tab. 1 Engine and catalyst parameters

参数	数值
排量/L	12
额定功率/kW	353
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 100
最大扭矩/(N·m)	1 970
排放水平	国 IV
催化剂涂层	V ₂ O ₅ /WO ₃ /TiO ₂
体积/m ³	0.028 38

表 2 试验工况下 NO_2/NO_x 百分比

Tab. 2 NO_2/NO_x percentage of test conditions %

排气 温度/°C	转速/(r·min ⁻¹)				
	1 200	1 350	1 500	1 650	1 800
280	0.31	0.24	0.2	0.16	0.12
330	0.41	0.46	0.42	0.25	0.24
380	1.01	0.95	0.57	0.41	0.51
430	1.56	1.38	1.23	1.13	1.24
480	2.26	2.51	2.52	2.46	2.34

表 2 示出各试验工况下, NO_2 在 NO_x 中所占的比例,可知 NO_2 占比不超过 3%, NO 所占比例占有绝对优势,试验发动机 SCR 系统的还原反应完全适用式(1),以及由此推导出的其他计算式。

2 试验结果与讨论

2.1 空速的影响

在不同的转速下,调节发动机负荷,使排气温度相同,按照 1:1 的氨氮比喷射尿素。当 SCR 上下游温差小于 20°C, NO_x 、 NH_3 浓度稳定后,取平均值。试验从高排气温度至低排气温度,以减小沉积物受热分解产生对取样气体的影响。图 2 是在不同 SCR 平均温度下,尿素分解出 NH_3 的效率、 NO_x 转化效率及 NH_3 泄漏量随空速的变化。在 SCR 平均温度为 280、330°C 时,随空速的增大, NO_x 的转化效率和尿素分解出 NH_3 的效率先增大后减小,空速较低时两者相差很小, NH_3 的泄漏量随空速增大逐渐升高; SCR 平均温度为 380°C 和 430°C 时, NO_x 的转化效率和尿素分解出 NH_3 的效率随空速增大而降低, NO_x 转化效率降低幅度更大,受空速的影响更明显。空速的增加使尿素在 SCR 系统内的停留时间减少,分解时间降低,在图 2 中,空速在 20 000 h⁻¹ 左右时,尿素分解出 NH_3 的效率最高。排温超过 380°C,空速超过 20 000 h⁻¹ 后,尿素分解效率总体呈上下波动,但相差不超过 3%。 NO_x 转化效率在空速超过 20 000 h⁻¹ 后主要呈降低趋势,相应的 NH_3 泄漏量

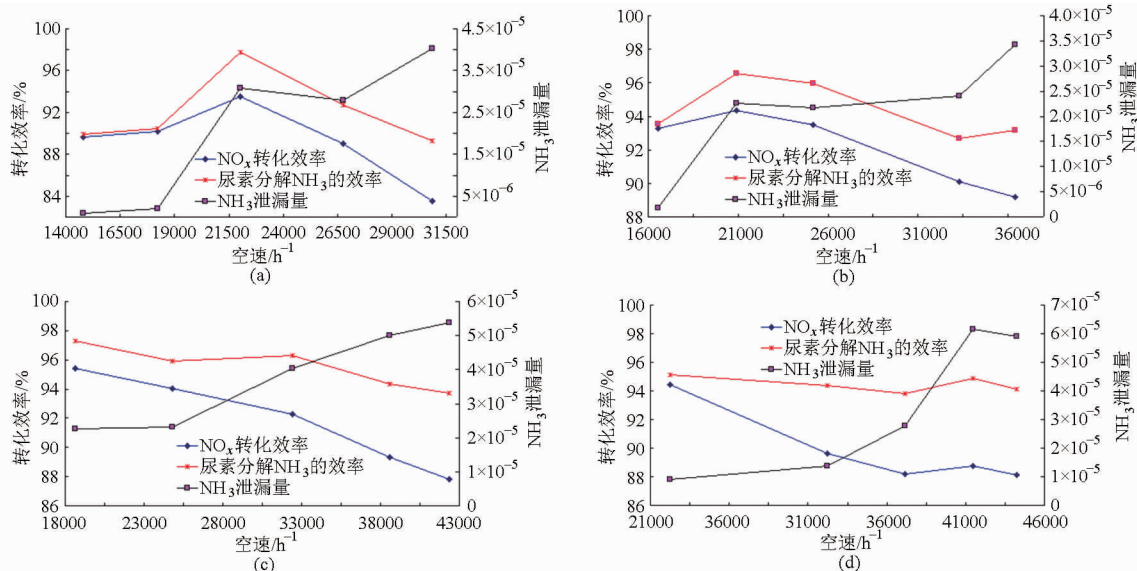


图 2 不同 SCR 平均温度下的 NO_x 转化效率、尿素分解效率和 NH₃ 泄漏量

Fig. 2 NO_x conversion efficiency, urea decomposition efficiency and NH₃ leakage at different SCR average temperatures

(a) 280°C (b) 330°C (c) 380°C (d) 430°C

则呈增大趋势。

SCR 平均温度为 380°C 和 430°C 时,尿素分解出 NH₃ 的效率仍然超过 93%,此时催化剂活性较高,但是较高的空速导致 NH₃ 与 NO_x 的接触时间降低,使 NH₃ 的泄漏量大幅增加,NO_x 还原效率大幅降低,比尿素的分解效率低 5% 左右。排气温度较高时,尿素分解出 NH₃ 的效率受空速的影响很小,但随空速的增大有所下降趋势。此时,空速增大不利于 NO_x 与 NH₃ 的还原反应,可以优化 SCR 催化器内部的流通管路,从而增大 NO_x 的停留时间,在以上温度范围内都有利于提高 NO_x 的转化效率,并且系统能提供足够的 NH₃。

2.2 氨氮比和温度的影响

控制发动机转速分别为 1 200、1 350、1 500、1 650、1 800 r/min,在每个转速下,调节发动机负荷,使 SCR 平均温度为 280、330、380、430、480°C。在每个 SCR 平均温度下,控制氨氮比分别为 0.45、0.65、0.85 喷射尿素水溶液。试验从高速高负荷到低转速低负荷,以尽量减小尿素沉积物受高温分解对试验结果产生影响,随发动机转速和负荷的降低,空速也随之减小。如图 3 所示,图中 0.45 尿素分解率表示氨氮比为 0.45 时尿素的分解效率,0.45 NH₃ 泄漏量表示氨氮比为 0.45 时, NH₃ 的泄漏量,其他以此类推,光滑曲线为尿素分解效率,折线为 NH₃ 泄漏量。在氨氮比分别为 0.45、0.65、0.85 时,图 3a、3b 中,随温度和空速的升高,尿素分解效率遵循先增大再减小的规律,尿素分解效率的最高点在 380°C 左右。图 3c 中,温度超过 330°C 后,尿素分解效率基本持平。图 3d、3e 中尿素分解效率总体呈升

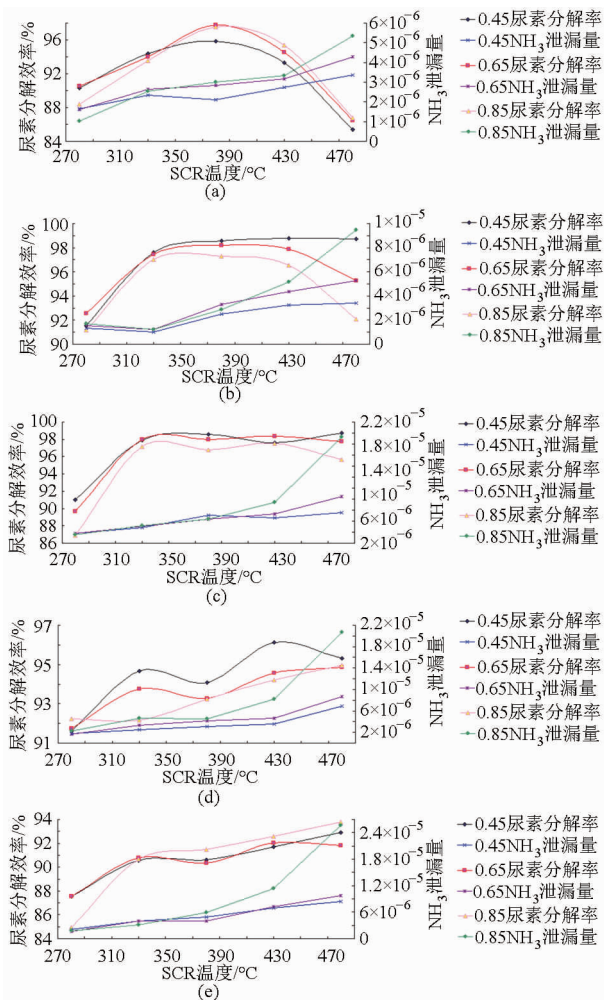


图 3 尿素分解效率和 NH₃ 泄漏量

Fig. 3 Urea decomposition efficiency and NH₃ leakage

(a) 1 200 r/min (b) 1 350 r/min (c) 1 500 r/min

(d) 1 650 r/min (e) 1 800 r/min

高趋势。图 3 中,在同一温度下,氨氮比对尿素分解

效率的影响并不明显,1 350 r/min、480℃工况中,尿素分解效率相差6%,其余所有试验工况尿素分解效率相差在3%以内。随温度的升高,氨氮比对尿素分解效率基本没有影响,空速影响了尿素和排气的混合情况,导致尿素转化效率出现上下波动。说明尿素分解效率主要受排气温度和空速的影响,通过二者的共同作用,在SCR系统管路中形成了不同的排气流场,排气流场对尿素分解效率产生了显著影响而导致。

SCR平均温度为380℃及以下时,NH₃的泄漏量基本相同,与氨氮比基本无关。温度为430℃和480℃时,NH₃的泄漏量随氨氮比的提高而增大,NH₃的泄漏量在氨氮比为0.85时增大明显,此时尿素分解出NH₃的效率相对其他工况并不高,结合图2~图5,可见尿素的分解效率与SCR系统NH₃的泄漏量并没有直接关系,而是较大的空速导致NH₃泄漏量超出限值。其次,当氨氮比增大时,喷射的尿素水溶液质量流量增加,排气流场使得尿素和尾气的混合不均匀也是NH₃泄漏量增大的一个影响因素。排气流场对尿素分解效率的影响以及尿素在管路中的分布需进一步使用可视化技术或者CFD模拟研究。

研究中,SCR温度和空速是影响尿素分解效率的最重要因素,尿素分解效率是两者综合作用的结果。在试验工况下,尿素的分解效率都比较高,未分解的尿素比例在3%~16%,这部分尿素有可能在

管路中形成沉积物。在不同空速、SCR温度下,合理控制氨氮比可以有效提高NO_x的转化效率而降低NH₃的泄漏量。优化SCR喷射参数以及系统流管路能够提高尿素的分解效率,减少沉积物的形成。研究中忽略了尾气取样时的误差,以及SCR催化器内其他还原、氧化反应的影响,尤其是尿素的实际喷射量与设定量的误差对通过理论计算所得的尿素分解出NH₃的效率有较大影响。

3 结论

(1)试验研究中,喷射的尿素水溶液分解出NH₃的效率较高,在催化剂活性温度范围内,SCR系统能够提供足够的NH₃以还原NO_x。NO_x的转化效率与尿素分解效率的变化趋势基本相同。

(2)空速和催化器温度是柴油机SCR系统尿素分解出NH₃的效率和NO_x转化效率最重要的影响因素。SCR平均温度不变时,空速超过一定范围后,尿素分解效率逐渐减低,NO_x的转化效率降低幅度更大。

(3)在氨氮比较高工况下,较大空速时导致NH₃的泄漏量超出限值,但是尿素分解效率仍能保持较高水平,氨氮比对尿素分解出NH₃的效率基本没有影响。此时排气流场对NO_x与NH₃的还原反应产生了重要影响,提高尾气与尿素水溶液的混合、优化SCR内部气体流动、扩散通道是提高NO_x转化效率、降低NH₃泄漏的重要途径。

参 考 文 献

- 1 黄锦成,沈捷. 车用内燃机排放与污染控制[M]. 北京:科学出版社,2012:114-117.
- 2 姜磊,葛蕴珊,李璞,等. 柴油机尿素SCR后处理系统排放特性试验研究[J]. 内燃机工程,2010,31(5):30-35.
Jiang Lei, Ge Yunshan, Li Pu, et al. Study on emission characteristics of urea-SCR aftertreatment system of diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(5): 30-35. (in Chinese)
- 3 赵航,王务林,杨建军,等. 车用柴油机后处理技术[M]. 北京:中国科学技术出版社,2010:92-97.
- 4 Akira Nishioka, Yoshihiro Sukegawa, Kozo Katogi, et al. A study of a new aftertreatment system (2): control of urea solution spray for urea-SCR[C]. SAE Paper 2006-01-0644, 2006.
- 5 Vadim O Strots, Shyam Santhanam, Brad J Adelman, et al. Deposit formation in urea-SCR systems [C]. SAE Paper 2009-01-2780, 2009.
- 6 Guanyu Zheng, Adam Fila, Adam Kotrba. Investigation of urea deposits in urea SCR systems for medium and heavy duty trucks [C]. SAE Paper 2010-01-1941, 2010.
- 7 冯向宇,葛蕴珊,马朝臣,等. 柴油机尿素SCR系统沉积物成因研究[J]. 内燃机工程,2014,35(6):1-6.
Feng Xiangyu, Ge Yunshan, Ma Chaochen, et al. Study on deposit formation in urea-SCR system of diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(6): 1-6. (in Chinese)
- 8 Johann C Wurzenberger, Roland Wanker. Multi-scale SCR modeling 1D kinetic analysis and 3D system simulation [C]. SAE Paper 2005-01-0948, 2005.
- 9 Strugess M P, Benjamin S F, Roberts C A. Spatial conversion profiles within an SCR in a test exhaust system with injection of ammonia gas modelled in CFD using the porous medium approach [C]. SAE Paper 2010-01-2089, 2010.
- 10 Schuler A, Votsmeier M, Kiwic P, et al. NH₃-SCR on Fe zeolite catalysts—From model setup to NH₃ dosing [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 154(1-3): 333-340.
- 11 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,2015,36(1):1-5.
Tang Tao, Zhao Yanguang, Hua Lun, et al. Experimental study of urea solution spray and decomposition of SCR system for diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(1): 1-5. (in Chinese)

- manual transmission [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2011, 49(5):1-17.
- 3 秦大同,陈清洪. 基于最优控制的AMT/DCT离合器通用起步控制[J]. *机械工程学报*,2011,47(12):85-91.
Qin Datong, Chen Qinghong. Universal clutch starting control of AMT/DCT automatic transmission based on optimal control[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(12):85-91. (in Chinese)
 - 4 李勇,常思勤,魏英俊. 基于转速/转矩控制的AMT换挡策略[J]. *中国机械工程*,2011,15(8):1880-1885.
Li Yong, Chang Siqin, Wei Yingjun. Shift strategy of AMT vehicle based on speed and torque control[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 15(8):1880-1885. (in Chinese)
 - 5 钟再敏,孔国玲,余卓平,等. 机械式自动变速器动力中断研究进展及解决方案[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2011, 39(12):1850-1855.
Zhong Zaimin, Kong Guoling, Yu Zhuoping, et al. Review on torque interruption and its solution of automated mechanical transmission[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(12):1850-1855. (in Chinese)
 - 6 林树森,常思勤,李波. 应用2自由度电磁执行器的AMT换挡控制[J]. *农业机械学报*,2014,45(4):14-21.
Lin Shusen, Chang Siqin, Li Bo. Gearshift control for AMT based on a 2-DOF electromagnetic actuator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4):14-21. (in Chinese)
 - 7 李波,常思勤,林树森. 电磁执行器直接驱动的AMT换挡机构[J]. *农业机械学报*,2013,44(10):29-35.
Li Bo, Chang Siqin, Lin Shusen. Shifting mechanism of AMT direct driven by electromagnetic linear actuator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(10):29-35. (in Chinese)
 - 8 张代林,陈幼平,艾武,等. 基于观测器模型的直线电机干扰抑制技术的研究[J]. *中国电机工程学报*,2007,27(12):14-18.
Zhang Dailin, Chen Youping, Ai Wu, et al. Research on disturbance suppression technology for linear motors based on a disturbance observer model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(12):14-18. (in Chinese)
 - 9 王丽梅,武志涛,刘春芳. 永磁直线伺服系统最优参数负载扰动补偿方法[J]. *电工技术学报*,2012,27(3):133-138.
Wang Limei, Wu Zhitao, Liu Chunfang. Optimal parameter load disturbance compensation method of permanent magnet linear servo system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012,27(3):133-138. (in Chinese)
 - 10 Zheng Q, Chen Z, Gao Z. A practical approach to disturbance decoupling control[J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(9):1016-1025.
 - 11 宋夫华,李平. 基于支持向量机 α 阶逆系统方法的非线性内模控制[J]. *自动化学报*, 2007, 33(7):778-781.
Song Fuhua, Li Ping. Nonlinear internal model control based on support vector machine α th-order inverse system method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(7):778-781. (in Chinese)
 - 12 Turner A, Ramsay K, Clark R, et al. Direct-drive rotary-linear electromechanical actuation system for control of gearshifts in automated transmissions[C]//*Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007:267-272.
 - 13 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M]. 北京:科学出版社,2005.
 - 14 Lin Shusen, Chang Siqin, Li Bo. Improving the gearshifts events in automated manual transmission by using an electromagnetic actuator [J]. *Proc. IMechE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, doi:10.1177/0954406214546204.
 - 15 李春文,苗原,冯元琨,等. 非线性系统控制的逆系统方法(I)——单变量控制理论[J]. *控制与决策*,1997,12(5):529-535.
Li Chunwen, Miao Yuan, Feng Yuankun, et al. Inverse system method for nonlinear systems control (I) —single variable control theory[J]. *Control and Decision*, 1997, 12(5):529-535. (in Chinese)
 - 16 Dorf R C, Bishop R H. *Modern control systems* [M]. 11th ed. New York: Pearson Prentice Hall, 2008.
 - 17 韩京清. 自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
 - 18 葛文庆,李波,赵彦峻,等. 基于直接驱动和自增力技术的AMT换挡系统[J]. *农业机械学报*,2014,45(9):1-7.
Ge Wenqing, Li Bo, Zhao Yanjun, et al. AMT shift system based on direct-drive and self-energizing technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014,45(9):1-7. (in Chinese)

(上接第286页)

- 12 赵彦光. 柴油机SCR技术尿素喷雾分解及氨存储特性的试验研究[D]. 北京:清华大学,2012.
Zhao Yanguang. Experimental study of urea solution spray and decomposition and ammonia storage in selective catalytic reduction system for diesel engines[D]. Beijing:Tsinghua University,2012. (in Chinese)
- 13 Christoph M Schar, Christopher H Onder, Hans P Geering. Control of an SCR catalytic converter system for a mobile heavy-duty application[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006,14(4):641-653.
- 14 刘传宝,颜伏伍,胡杰,等. 柴油机SCR后处理系统控制策略[J]. *农业机械学报*,2013,44(11):6-11.
Liu Chuanbao, Yan Fuwu, Hu Jie, et al. SCR post processing system control strategy of diesel engine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(11):6-11. (in Chinese)
- 15 陈朝辉,李志军,高立波,等. $\text{La}_2\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_4$ 催化去除柴油机 NO_x 和PM排放台架试验[J]. *农业机械学报*,2012,43(9):11-15.
Chen Zhaohui, Li Zhijun, Gao Libo, et al. Simultaneous removal of diesel NO_x and soot over $\text{La}_2\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_4$ perovskite-type catalysts[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012,43(9):11-15. (in Chinese)