

多孔管结构对柴油机 SCR 流场和催化特性影响的研究

成东康¹, 郑清平¹, 焦运景², 贾新颖³, 刘佳鑫¹

(1. 河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401; 2. 北华航天工业学院, 廊坊 065000;

3. 天津雷沃动力有限公司, 天津 300402)

Effects of Porous Pipe Structure on Flow Field and Catalytic Characteristics of a Diesel SCR System

CHENG Dongkang¹, ZHENG Qingping¹, JIAO Yunjing², JIA Xinying³, LIU Jiaxin¹

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China;

3. Tianjin Lovol Engine Co., Ltd., Tianjin 300402, China)

Abstract: A CFD numerical calculation model was established to simulate the flow and purifying effect of a diesel urea selective catalytic reduction (SCR) system with different porous tubes at the front end of the catalytic converter. Effects of different porous pipe structures on pressure distribution and loss, flow field distribution, ammonia uniformity and NO_x conversion rate were analyzed under the conditions of A25 and rated load respectively. Results show that the influence of the addition of porous tubes and different porous tube structures on the flow field and catalytic characteristics of the SCR system is different, in which the porous tube II has the most obvious influence on the flow field distribution and pressure loss, ammonia uniformity and NO_x conversion rate, resulting in a pressure loss of 1.2 kPa and NO_x conversion rate increase of about 8%. The numerical error between the test result and the simulation calculation is in a reasonable range, which verifies the accuracy of the simulation calculation and the rationality of the structure design.

摘要: 针对催化器前端 3 种不同结构的多孔管建立 CFD 数值计算模型, 进行柴油机尿素选择性催化还原(urea-SCR)系统的流动和净化效果的模拟, 分析了 A25 工况和标定工况下不同多孔管结构对压力分布及压力损失、流场分布、氨气分布均匀性、 NO_x 转化率的影响。结果表明: 添加多孔管前后及不同多孔管结构对流场和催化特性的影响均不同, 其中多孔管 2 对流场分布、压力损失、氨气均匀性和 NO_x 转化率的影响最明显, 压力损失达到了 1.2 kPa, NO_x 转化率提升了 8% 左右。试验结果与模拟计算的数值误差在合理范围, 验证了模拟计算的准确性和结构设计的合理性。

关键词: 柴油机; 模拟计算; 选择性催化还原; 多孔管; 均匀性; 转化率; 氮氧化物

Key words: diesel engine; simulation; selective catalytic reduction(SCR); porous tubes; uniformity; conversion rate; NO_x

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.05.009

中图分类号: TK421⁺.5

文献标识码: A

收稿日期: 2016-06-18

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2015409022); 国家“九七三”重点研究发展计划项目(2016YFD0700800)

Fund Project: Project of Hebei Natural Science Foundation(E2015409022); 973 National Key R & D Project(2016YFD0700800)

作者简介: 成东康(1991—), 男, 硕士生, 主要研究方向为内燃机性能仿真与优化, E-mail: 2361565368@qq.com;

郑清平(联系人), 女, 教授, 主要研究方向为内燃机工作过程, E-mail: qpzh163@163.com。

0 概述

随着环境污染加剧及汽车保有量增加,汽车尾气排放法律法规越来越严格,传统的车用发动机仅依靠优化燃烧等机内净化技术已难以满足更严格的排放限值,必须采用相应的机外处理技术。 NO_x 排放是柴油机排放污染物控制的重点。尿素选择性催化还原(urea-SCR)技术对限制 NO_x 排放有很好的效果且燃油经济性好,对油品要求不高,催化剂活性高,被认为是限制 NO_x 排放最有前景的技术^[1]。结合中国国情,SCR 技术也被认为是中国控制柴油机 NO_x 排放的发展方向,现已得到了部分实际应用。

柴油机的运行工况多变,排气的流量、温度及污染物的浓度会有很大的波动,所以影响 urea-SCR 系统性能的因素很多。研究发现催化器的性能受其内部的流动特性尤其是载体径向截面上速度和还原剂分布的影响很大。中国对催化器的研究主要集中在催化剂的配方和制备工艺上^[2-3];此外也有学者对催化器系统的结构进行了研究,为锥形催化器设计了叶片式及挡板式混合器,以改善还原剂分布的均匀性和流场流速分布,并提高 NO_x 转化率^[4-5];文献^[6]研究了多孔管开孔区域角对催化器内气流分布的影响。

本文利用 AVL-FIRE 软件对不同结构多孔管的 urea-SCR 系统进行了三维数值模拟,分析对比了不同的多孔管结构对催化器内流场、压力、氨气和 NO_x 分布的影响,探究了多孔管的结构对整个 urea-SCR 系统及 NO_x 转化率的影响。通过试验对模拟结果进行验证,取得了良好的验证效果,为 SCR 系统的优化提供了指导,为提升催化器的转化效率提供了可靠的技术方案。

1 尿素 SCR 系统

如图 1 所示,尿素 SCR 系统主要由催化转化装置、控制装置、检测装置、尿素喷射装置等组成。图 2 所示为催化转化装置的网格模型,模型的进口直径 86 mm,渐扩管长度 191 mm,SCR 载体部分长 180 mm,尾部是由直径 266 mm 的直管和直径为 86 mm、155°的弯管组成,所用载体直径为 264 mm,筛网孔径 48 μm (即 300 目),壁厚 0.3 mm。

催化还原反应是在催化转化装置中进行的,反应过程将质量分数 32.5% 的尿素溶液喷入到高温排气中进行蒸发热解,生成还原剂 NH_3 。进入载体前 NH_3 和废气混合,混合气通过载体时在催化剂的作用下发生选择性催化还原反应, NH_3 将 NO_x 还原成 N_2 和 H_2O ,从而降低 NO_x 排放。

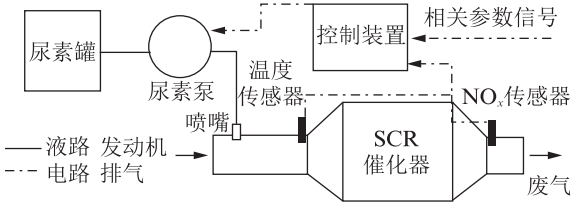


图 1 SCR 系统及其控制装置示意图

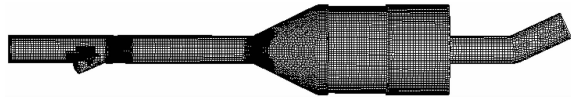
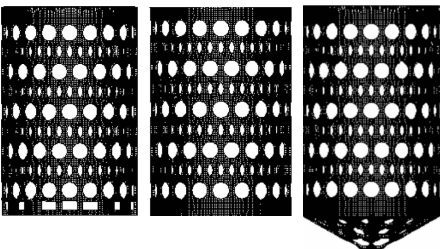


图 2 SCR 计算网格模型

为了改善前锥管处流场分布和氨气的均匀性进而提高 NO_x 转化率,对前锥管的结构进行改变,在前锥管前端添加了 3 种不同结构的多孔管。多孔管 1 是在管子的侧面和底部布满直径为 11 mm 的孔,多孔管 2 在管子侧面布满孔而底部封死,多孔管 3 的底部被改成顶角为 120°的圆锥形并在底部打孔,如图 3 所示。



(a) 多孔管1 (b) 多孔管2 (c) 多孔管3

图 3 不同结构多孔管的网格模型

2 计算理论模型

2.1 模型计算理论

通过电子控制系统将尿素溶液从喷嘴喷入 SCR 系统,尿素溶液经过喷雾雾化和蒸发等物理变化最终以小液滴的形式与废气混合,混合后的尿素液滴在高温下热解生成还原剂氨并与废气进一步混合发生相关的化学反应,表 1 给出了相关的理论模型。

表 1 理论计算模型

计算模型	理论依据
湍流模型	k - ϵ - f 四方程模型 ^[7]
多孔介质模型	Forchheimer 模型 ^[6]
喷雾模型	离散液滴模型 ^[6]
蒸发模型	Dukowicz 模型 ^[8]
氨的形成	$(\text{NH}_2)\text{CO}(\text{aq}) \rightarrow (\text{NH}_2)\text{CO}(\text{s}) + 7\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ $(\text{NH}_2)\text{CO}(\text{s}) \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HCNO}$ $\text{HCNO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$
SCR 主要化学反应	$4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $2\text{NH}_3 + \text{NO} + \text{NO}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ $8\text{NH}_3 + 6\text{NO}_2 \rightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$

2.2 SCR 催化转化器的性能评价指标

2.2.1 压力损失

压力损失是催化器进口压力和出口压力的差值。催化器内的催化剂载体有蜂窝状的孔道,成为造成压力损失的主要原因,对此可以采用降低壁厚的方法。

压力损失过大会使残余废气量增加,充气系数降低,同时排气损失功会增加,用功降低,致使发动机的动力性、经济性降低。

2.2.2 NO_x转化率

NO_x的转化率是衡量 SCR 性能的重要指标之一,其计算公式如下:

$$\eta_{\text{NO}} = \frac{C_{\text{NO},\text{in}} - C_{\text{NO},\text{out}}}{C_{\text{NO},\text{in}}} \quad (1)$$

式中, $C_{\text{NO},\text{in}}$ 、 $C_{\text{NO},\text{out}}$ 分别为进出口的 NO_x浓度。

2.2.3 流体分布均匀性

流体分布均匀性是指流体在任意截面上的流速、浓度等分布的均匀程度。良好的流体分布均匀性可以延长混合气体停留在催化层的时间,从而降低 NO_x的排放,同时也会增加 SCR 的耐久性,降低 NH₃的泄漏。流体分布不均匀,低速区会产生积灰阻塞催化剂,高速区则会对催化剂进行冲蚀和磨损。流体均匀性和催化器的结构分布有直接的关系。均匀性计算公式如下:

$$\gamma = 1 - \sum_{i=1}^N \frac{|\alpha_i - \bar{\alpha}| X_i}{2 \bar{\alpha} X} \quad (2)$$

式中, α_i 为网格 i 的组分浓度或者排气流速; $\bar{\alpha}$ 为截面的平均浓度或者平均流速; X_i 为网格 i 的面积; X 为截面面积; N 为截面的网格总数。

2.3 边界条件

选用两个不同工况进行模拟计算,分别为 A25 工况(下文简称为小工况)和标定工况(下文简称为大工况)。A25 工况发动机转速为 1 500 r/min,负荷为 25%;标定工况发动机转速为 2 250 r/min。将质量流量和温度定义为入口条件,静压(100 kPa)作为出口条件。特征长度是进口直径的 10%,湍流速度根据入口的质量流量进行估算,湍动能设定为进口平均速度平方的 10%,计算时间总共为 15 s,5 s 时开始喷射尿素。表 2 和表 3 给出了具体数值。

表 2 工况点的边界条件

工况点	尾气质量流量/ (kg·h ⁻¹)	温度/℃	喷射尿素质量流量/ (kg·h ⁻¹)
标定工况	1 100	552	3.16
A25 工况	345	240	0.64

表 3 入口气体组分浓度

气体名称	质量分数	
	标定工况	A25 工况
CO ₂	0.081 1	0.048 3
H ₂ O	0.075 5	0.044 9
NO ₂	0.000 418	0.000 278
NO	0.000 501	0.000 300
N ₂	0.759 281	0.771 722
O ₂	0.083 2	0.134 5

3 模拟计算结果及分析

3.1 多孔管对流场分布的影响

流场的分布分析是整个模拟的基础,影响 NH₃和 NO_x的分布及其混合效果。流场的分布主要分为高速区(射流区)和低速区(涡流区),但是不同结构的多孔管对前锥管处流场分布有明显不同的影响。如图 4 和图 5 所示,多孔管 1 和多孔管 3 的流场分布相对集中,高速区和低速区没有明显的过渡,高流速的流体主要从多孔管底部和侧面下部的孔流出,多孔管内部及底部孔的方向形成高流速区,在高流速区两侧有微弱的涡流区,尤其是在低负荷时壁面附近有明显的低速区,这种情况会随着负荷的提高得到改善。因为低负荷时流体流速小且多孔管底部小,孔的导流作用致使流体不能在边界产生较强的涡流,再加上壁面的粘滞作用使流体的湍动能得到消耗而产生弱流区。多孔管 2 的流场分布更均匀,因为多孔管底部的阻挡作用,在靠近壁面对称的两侧形成两个大的涡流,涡流对整个前锥管内部空间的流体有扰动作用,打破了壁面附近的边界层,使整个流场分布更均匀。从两个工况对比来看,随着负荷即排气流速的增大,流场分布基本相似,多孔管 1 和多孔管 3 的涡流区有一定加强,但不是很明显,总体涡流强度都不及多孔管 2。

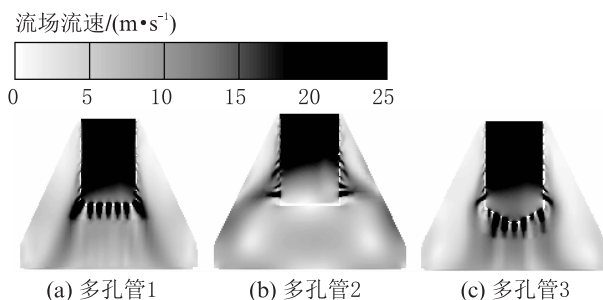


图 4 时间 15 s 时不同多孔管前锥管处流场分布(A25 工况)

对比图 6 中数据,两个工况下多孔管的加入对速度均匀性均有一定改善:小工况的流速均匀性改善比较明显,3 个多孔管的增幅分别为 7.63%、

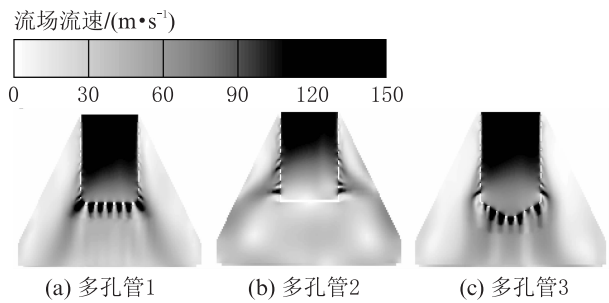


图 5 时间 15 s 时不同多孔管前锥管处流场分布(标定工况)

9.69%、7.38%；大工况时前锥管处的速度均匀性比小工况稍差,增幅分别为 3.40%、8.74%、1.21%。这是因为,大工况时多孔管的导流作用更强,使得高速区的流速比涡流区增加得更多。这说明流场分布受多孔管的结构影响较大,从流场分布的均匀性来看多孔管 2 的结构比较理想。

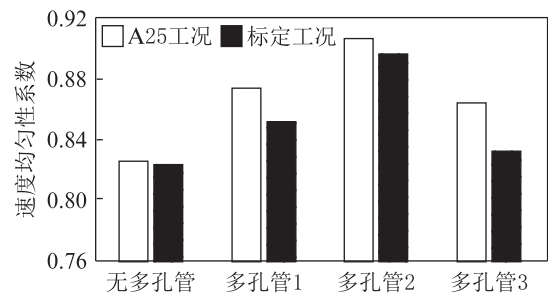


图 6 不同工况下多孔管载体前端速度均匀性对比

3.2 多孔管对压力损失的影响

多孔管结构差异引起内部流场的不同,故不同的多孔管对压力损失也有不同的表现。图 7、图 8 所示为前锥管处的压力分布,添加多孔管后压力损失的计算结果见表 4。

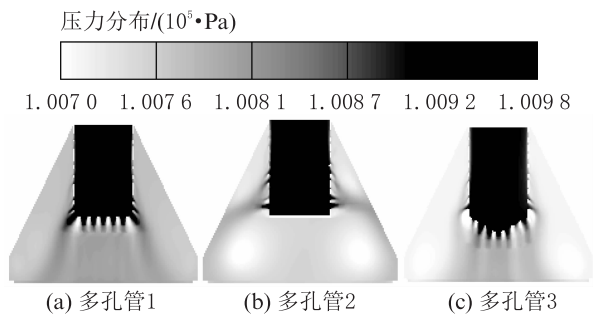


图 7 时间 15 s 时不同多孔管前锥管处压力分布(A25 工况)

压力分布图显示:不同结构的多孔管压力分布不同,流体流过多孔管后压力降低。表 4 中的数据表明,加入多孔管后载体前端的压力损失有所增加,A25 工况时 3 种多孔管压力损失的增加量分别为 0.055 kPa、0.075 kPa、0.045 kPa,标定工况时为 1.000 kPa、1.200 kPa、0.800 kPa。这是由于多孔管

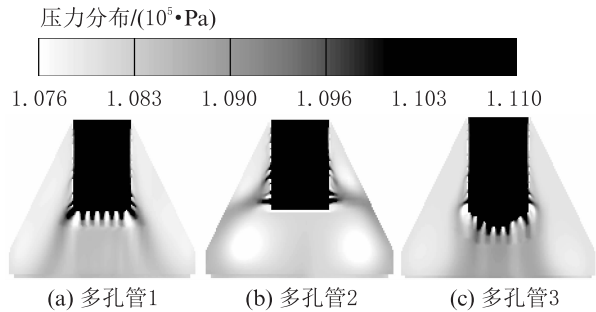


图 8 时间 15 s 时不同多孔管前锥管处压力分布(标定工况)

表 4 压力损失数据对比

工况点	压力损失/kPa			
	无多孔管	多孔管 1	多孔管 2	多孔管 3
A25 工况	0.125	0.180	0.200	0.170
标定工况	1.900	2.900	3.100	2.700

的存在增加了局部流动损失,而多孔管 2 产生较大的涡流区其压力损失最大,压力损失的增加会使发动机的性能下降,但是从数据上看压力损失的增加量很小,最多不会超过总压力的 1%,不会对发动机的性能产生明显的影响。

3.3 多孔管对氨气分布的影响

多孔管对氨气分布的影响主要体现在氨气的生成量和氨气在载体前端的分布均匀性上。氨气是尿素水溶液喷入之后蒸发热解形成的,这个过程需要一定的时间,而适当的气流运动会促进氨气的生成及改善其分布均匀性,氨气的生成量和分布的均匀性对 NO_x 的转化率有重大影响。

对比图 9 和图 10 可知,标定工况 NH₃ 的生成量比 A25 工况多,在高负荷下排气的流量和流速较高,使喷出的尿素溶液受气流的拖拽作用较大,不容易发生撞壁现象,从而使较多的尿素溶液混入废气中,同时排气温度较高也利于尿素溶液的蒸发和热解。图 11 和图 12 也表明多孔管的结构对 NH₃ 分布产生了影响,经过多孔管后两种工况下多孔管 2 的 NH₃ 分布更均匀。从图 13 和图 14 中也可以看到不同多孔管结构对 NO 的分布影响也很大,虽然在整个前锥管内不同工况下 NO 的分布不同,但总体呈现出 NO 浓度梯度随负荷的增大而变大的趋势。

由图 15 可知,A25 工况的均匀性比标定工况的要好。两种工况下多孔管 2 的均匀性最好,在 A25 工况时能达到 0.905,没有多孔管时只有 0.821,改善幅度为 10.2%。标定工况时多孔管 2 氨气分布均匀性为 0.892,没有多孔管时均匀性为 0.792,改善幅度为 12.6%。综上可

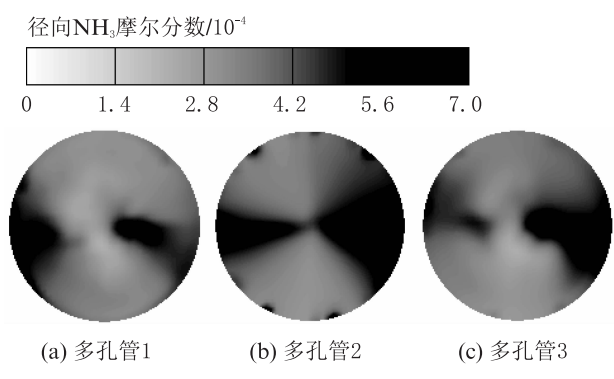


图 9 时间 15 s 时多孔管对载体前端 NH_3 分布影响 (A25 工况)

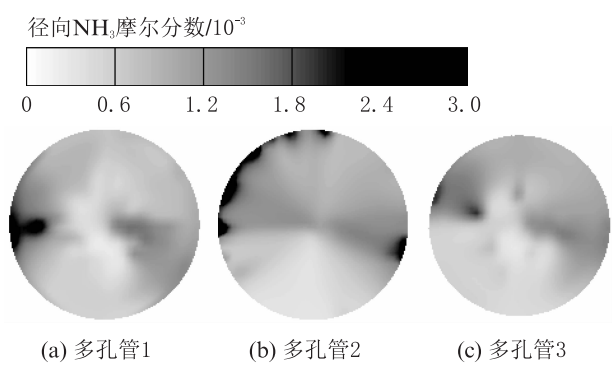


图 10 时间 15 s 时多孔管对载体前端 NH_3 分布影响 (标定工况)

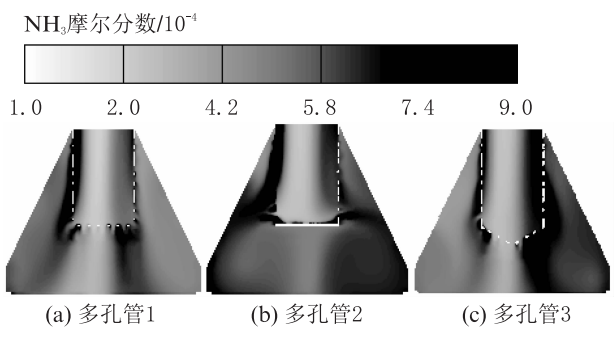


图 11 时间 15 s 时不同多孔管前锥管处 NH_3 分布 (A25 工况)

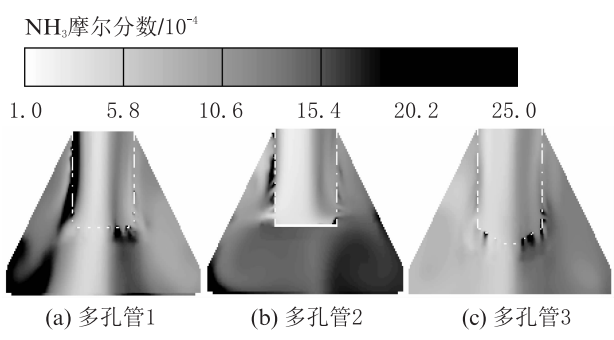


图 12 时间 15 s 时不同多孔管前锥管处 NH_3 分布 (标定工况)

知,添加多孔管结构可以改善氨气分布的均匀性。

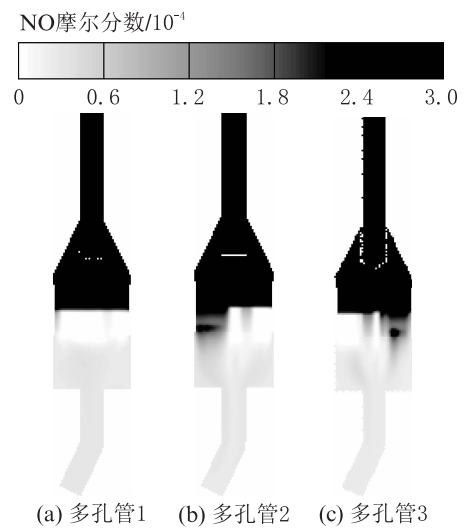


图 13 时间 15 s 时 A25 工况不同多孔管结构 NO 分布

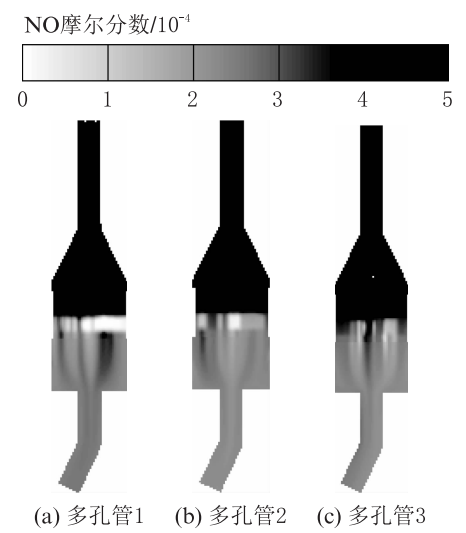


图 14 时间 15 s 时标定工况不同多孔管结构 NO 分布

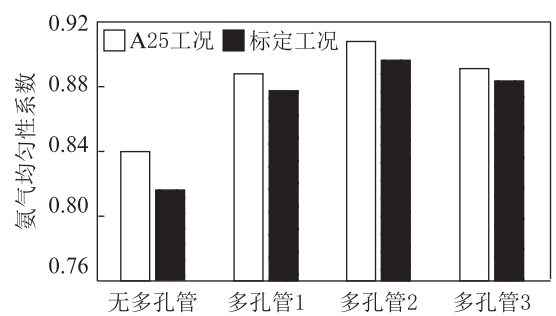


图 15 不同工况下多孔管载体前端氨气均匀性对比

3.4 多孔管对 NO_x 转化率的影响

NO_x 转化率受排气温度、排气流量、催化剂结构及氨气分布的均匀性影响较大,是几个因素综合作用的结果。图 16 给出了 A25 工况和标定工况下不同多孔管结构 NO 转化率的对比。从图 16 中可以看出小工况下 NO 转化率高,小工况

时 NO 转化率达到 75%~84%，大工况时 NO 转化率为 65%~75%。综合分析原因，虽然 A25 工况排气温度低于标定工况，但排气流量小，此时 NO_x 浓度比较低，空速较小，且由前面计算结果可知，还原剂 NH₃ 的均匀性也好于标定工况，还原剂 NH₃ 和 NO_x 有更多的反应时间，综合来看 A25 工况时有利于 NO_x 转化的条件更多，故其 NO_x 转化率比标定工况高。由图 16 还可以看出，NO_x 转化率随尿素溶液喷射时间的变化趋势受不同负荷、不同多孔管结构影响较小，在尿素喷射一定时间后 NO_x 转化率基本维持在一个稳定值，而且只要反应温度、物质浓度、催化剂性能达到要求，催化还原反应达到稳定的反应时间基本不受负荷大小和多孔管结构的影响。

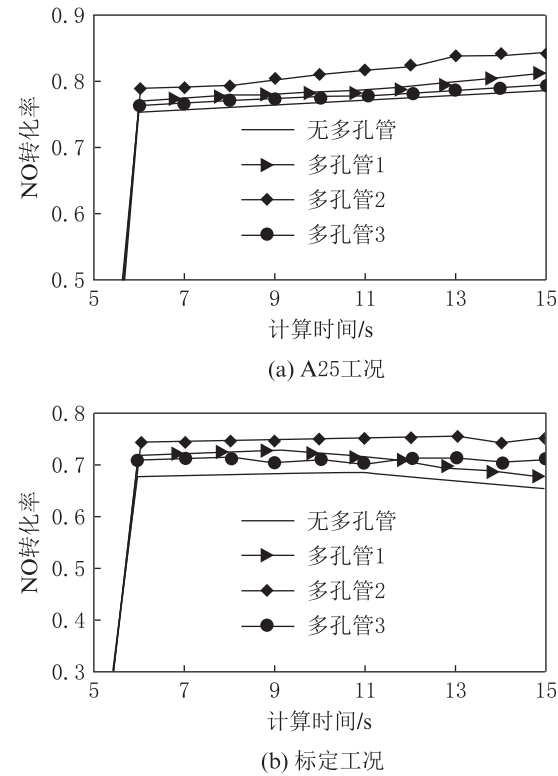


图 16 NO 转化率对比图(5 s 时开始喷尿素)

添加多孔管后 NO_x 转化率明显提高了，3 种多孔管中多孔管 2 的提高作用最显著，使 NO_x 转化率提升了 8% 左右。相同工况下多孔管 1 和多孔管 3 对 NO_x 转化率的影响大致相同，使 NO_x 转化率提升了 5% 左右。多孔管 1 和多孔管 3 的流场分布和 NH₃ 的均匀性相差不大，多孔管 2 的结构对提高 NO_x 转化率帮助更大。

4 试验验证

试验用机为直列 6 缸增压中冷式柴油机，缸径

100 mm，行程 127 mm，加装了带有废气旁通阀的增压器、中冷器，采用了电子控制高压共轨燃油喷射系统，同时优化了燃烧系统，在添加后处理之后可以满足国 IV 排放标准。发动机标定功率为 202 kW，最大扭矩 900 N·m(1 300~1 800 r/min)。

试验中 A25 工况和标定工况尿素溶液的喷射量和计算模拟的边界条件设置的数值相同。图 17 为试验中的后处理系统。试验设备主要包括气体分析仪、NO_x 传感器、发动机数控试验台、电力测功机、油耗仪等设备，具体数据如表 5 所示。

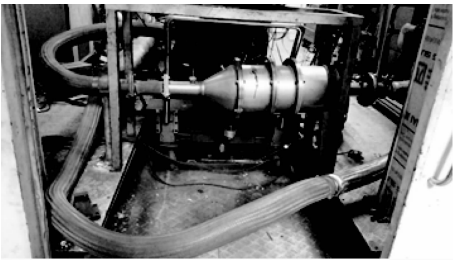


图 17 试验台架上的后处理系统

表 5 试验用设备及参数

设备名称	设备型号	生产厂家
NO _x 传感器	UNINO _x	Continental
发动机数控试验台	AVL PUMA OPEN 5.1	奥地利 AVL 公司
气体分析仪	组分分析仪	日本 HORIBA
电力测功机	Schneider Electric Power	奥地利 AVL 公司
油耗仪	Drives AVL 735	奥地利 AVL 公司

试验方法及过程如下：(1) 检查发动机和试验设备，确保传感器安装正确牢固，确定燃油系统等正常运行，保证实验室温度、湿度符合要求。(2) 启动柴油机进行预热，一般需要 15~20 min。确保排气背压、中冷压差、进气阻力、进气温度等边界条件在试验规定范围内。(3) 依次添加不同工况不同多孔管结构的后处理 SCR 系统，并确定 SCR 前后的传感器安装是否完好，试验过程确保测量柴油机同一状态下计算的排放值。(4) 试验时待发动机运行稳定后，利用 NO_x 传感器测量 SCR 系统催化剂进出口 NO_x 的浓度值。

试验测量得出了 A25 工况和标定工况下不带多孔管和分别带 3 种不同多孔管共 8 种情况的 NO_x 转化率值，对比结果如图 18 和图 19 所示。A25 工况的 NO_x 转化率高于标定工况。试验和计算数据的对比最大误差约为 5%，说明计算模拟的数据准确合理，这主要是因为计算模拟的边界条件和尿素喷射等数据均采用试验测量值，数值的准确度较高。

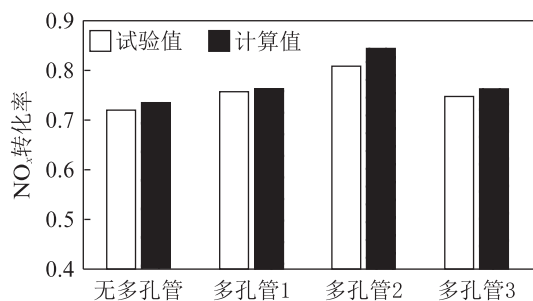
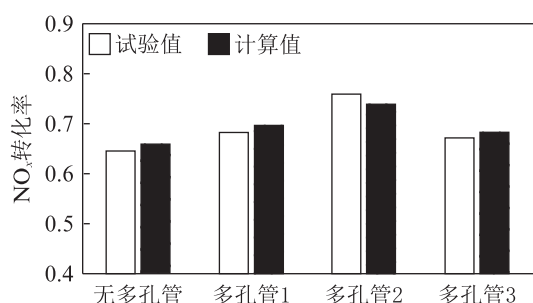
图 18 NO_x 转化率试验值和计算值对比(A25 工况)图 19 NO_x 转化率试验值和计算值对比(标定工况)

图 18 和图 19 的试验结果表明:A25 工况时添加 3 种多孔管 NO_x 转化率的变化率为 4.44%、11.79%、3.19%;标定工况时的变化率为 6.28%、18.07%、4.83%;高负荷时 NO_x 转化率的变化率大于低负荷,表明在高负荷大流速时多孔管的作用更明显。对于不同结构的多孔管 SCR 系统,加装多孔管 2 的 SCR 系统 NO_x 的转化效率更好,可见多孔管 2 的结构更合理。

5 结论

(1) 不同结构的多孔管对 SCR 内部流场、压力分布和 HN_3 、 NO 分布及 NO_x 转化率的影响明显不同,添加多孔管结构可提高 NO_x 转化率。

(2) A25 工况 NO_x 转化率要优于标定工况。

(3) 在试验的 3 种多孔管中,多孔管 2 在流场分布、 NH_3 的分布均匀性及 NO_x 转化率均最优,但压力损失有所增加。随负荷的增加,压力损失也加大,但不超过总压力的 1%。

(4) 试验结果和模拟结果吻合得比较好,说明结构设计与模拟过程合理。试验和模拟结果都表

明:综合考虑各方面因素,多孔管 2 的结构是 3 种多孔管中最优的设计。

参考文献:

- [1] KOEBEL M, ELSENER M, KLEEMANN M. Urea-SCR: a promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines[J]. Catalysis Today, 2000,59(3):335-345.
- [2] 刘梦钦,李彦明,刘成良. 车用催化器流场的数值模拟与结构优化设计[J]. 机械设计与研究,2010(2):59-63.
LIU M Q, LI Y M, LIU C L. Numerical simulation of flows in automotive catalytic converters with a novel deflector and its structure optimum design[J]. Machine Design and Research, 2010(2):59-63.
- [3] 王谦,李硕,徐航,等. 柴油机 urea-SCR 系统带导流装置扩张管及催化器内部特性分析[J]. 内燃机工程,2016,37(1):31-37.
WANG Q, LI S, XU H, et al. Analysis of internal characteristics of expansion pipe with flow deflector and catalytic converter in diesel urea-SCR system [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016,37(1):31-37.
- [4] 赵彦光,胡静,陈镇,等. 重型柴油机 NO_x 尿素 SCR 混合器的设计与试验研究[J]. 内燃机工程,2012,33(1):32-37.
ZHAO Y G, HU J, CHEN Z, et al. Design and experiment of mixer in NO_x urea-selective catalyst reduction system for heavy duty diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012,33(1):32-37.
- [5] 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]. 内燃机工程,2015,36(3):50-57.
WANG Q, ZHANG D, HE Z X, et al. Numerical simulation of diesel engine urea-SCR system and its mixer structure optimization [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015,36(3):50-57.
- [6] 吴里程,王谦,王静,等. 车用 urea-SCR 系统结构参数优化研究[J]. 车用发动机,2015(6):59-64.
WU L C, WANG Q, WANG J, et al. Optimization of structural parameters for vehicle urea-SCR system[J]. Vehicle Engine, 2015(6):59-64.
- [7] STRÖM H, LUNDSTRÖM A, ANDERSSON B. Choice of urea-spray models in CFD simulations of urea-SCR systems[J]. Chemical Engineering Journal, 2009,150(1):69-82.
- [8] 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,2009,27(3):249-254.
WEN M M, LÜ L, GAO X H. Modelling of urea-SCR exhaust aftertreatment system for diesel [J]. Transactions of CSICE, 2009,27(3):249-254.