

节能环保

SCR载体尺寸对背压及NO_x转化效率的影响

刘宇^{1,2}, 张允华¹, 廖程亮², 赵挺², 代士青², 张海冲²

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 江西五十铃汽车有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要:基于发动机台架试验研究了不同选择性催化还原(SCR)载体尺寸的性能差异。结果表明:SCR载体尺寸会显著影响SCR系统的性能,载体长度增加导致排气背压明显增大,但SCR系统的氮氧化物(NO_x)转化效率提升不显著;增大载体直径可同时实现排气背压降低和NO_x转化效率提升;当排气温度高于尿素起喷温度时,加大尿素喷射量后,相比于直径为118.4 mm的SCR载体,直径为143.8 mm的SCR载体性能可提升2倍。

关键词:选择性催化还原;载体尺寸;排气背压;NO_x转化效率

0 前言

根据中国移动源环境管理年报,2022年全国机动车氮氧化物(NO_x)排放量为526.7万t,以柴油货车为代表的移动源,其排放的NO_x约占全国机动车排放总量的60%,严重污染环境和损害人体健康^[1]。为加强环境保护,2020年7月开始,我国全面实施国六排放法规,NO_x排放限值要求分阶段提高了70.7%和39%^[2]。面对NO_x排放限值大幅提高,仅依靠发动机机内净化很难达到技术要求,因此需要借助尾气净化技术。选择性催化还原(SCR)系统是目前一种高效的柴油机NO_x减排技术^[3-4]。由于SCR系统在低温阶段的转化效率不高,为解决冷启动阶段NO_x的排放问题,在更靠近发动机排气口的位置增加了带选择性催化还原的柴油机颗粒捕集器(SDPF)^[5];同时,为了提高NO_x转化率,SDPF中分子筛的涂覆量需要达到SCR系统的3倍左右^[6],这势必增大了系统背压,降低了燃油经济性。

国内外学者从SCR载体体积^[7-8]、喷射策略^[9]等方面进行了排气背压优化和性能影响研究,结果表明,SCR催化剂结构是影响系统背压及NO_x转化效率的关键因素。本文在某国六轻型柴油机的基础上,通过发动机台架试验研究SCR载体尺寸对背

压和性能影响,旨在为SCR系统性能优化提供参考依据。

1 试验装置与试验方案

1.1 试验装置

选用的发动机为某2.5 L 4缸增压中冷柴油机,其基本参数见表1。

表1 发动机主要技术参数

结构与参数	指标与参数值
发动机型式	直列4缸
进气方式	增压中冷
缸径/mm	92
活塞行程/mm	94
总排量/L	2.5
压缩比	17
额定功率/kW	110
额定功率转速/(r·min ⁻¹)	3 600
最大排气质量流量/(kg·h ⁻¹)	540
最大排气温度/℃	621

该发动机的尾气后处理系统布置由氧化型催化器(DOC)、SDPF、SCR系统组成,其中SDPF前的混合器和SDPF组成一个总成,在混合器前安装有尿素喷射单元,SCR系统则备有3套不同尺寸的载体,如图1所示。该尾气后处理主要技术参数见表2。

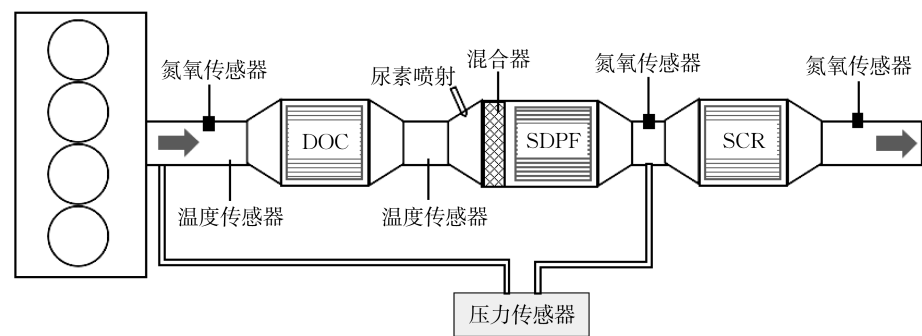


图1 尾气后处理系统布置

表2 尾气后处理系统主要技术参数

参数	DOC	SDPF	SCR		
			1号	2号	3号
涂层类型	贵金属	铜基分子筛	铜基分子筛	铜基分子筛	铜基分子筛
涂覆质量浓度/(g·in ^{-3①})	95.0	9.7×10 ⁻⁴	1.4×10 ⁻³	1.4×10 ⁻³	1.4×10 ⁻³
载体材料	堇青石	钛酸铝	堇青石	堇青石	堇青石
目数	400	350	400	400	400
壁厚/mil ^①	4	12	4	4	4
直径/mm	118.4	177.8	118.4	118.4	143.8
长度/mm	152.4	177.8	203.2	152.4	152.4
体积/L	1.68	4.40	2.24	1.68	2.47

注:① 为了符合本行业的计量习惯,此处采用非法定计量单位,1 g/in³=6.25×10⁴ g/m³,1 mil=0.025 4 mm。

在DOC上游、SDPF下游、SCR系统下游均安装氮氧传感器,用于采集管路该位置处的NO_x质量浓度;在DOC上游和SDPF上游安装有温度传感器,用于实时读取管路内的排气温度;在DOC上游和SCR系统上游设置有导气管,接入台架压力传感器,可分别读取该位置的气流压力,DOC上游读取的是总排气背压,SCR系统上游读取的是SCR系统背压。

1.2 试验方案

1.2.1 工况点设置

根据图2所示的发动机万有特性制定测试工况,见表3,其中工况1为额定功率点工况,工况2为高温高流量工况,工况3为低温高流量工况。

1.2.2 背压测试

试验采用SDPF和SCR系统组成的双后处理系统,分别测试3组SCR载体在额定功率点工况(工况1)的排气背压和总背压差异。背压测试过程中缓慢提升转速和负荷,待发动机功率到达最大功率稳定后读取压力传感器的数值并保存记录,每组测试完成冷机后更换SCR载体并重复上述操作。

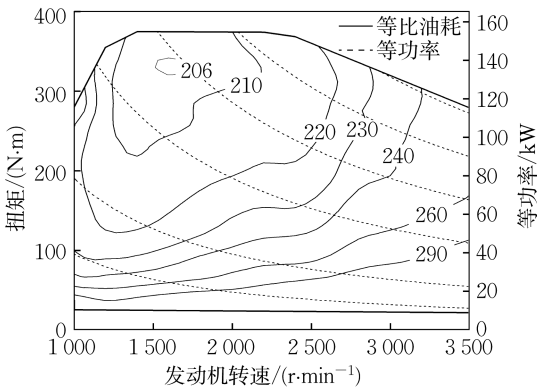


图2 发动机万有特性图

表3 测试工况点

参数	工况1	工况2	工况3
转速/(r·min ⁻¹)	3 600	2 300	3 600
扭矩/(N·m)	294	338	50

1.2.3 NO_x转化效率测试

分别测试3组SCR载体在设定的尿素喷射量下的NO_x转换效率。在发动机转速和扭矩到达目

标点后读取各处温度、NO_x质量浓度和排气质量流量,通过NO_x质量浓度换算转化成各阶段的NO_x转化效率,具体表达式为:

$$\eta_{\text{SDPF}} = \frac{(C_{\text{DOC in}} - C_{\text{SDPF out}})}{C_{\text{DOC in}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_{\text{SCR}} = \frac{(C_{\text{SDPF out}} - C_{\text{SCR out}})}{C_{\text{SDPF out}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_{\text{Total}} = \frac{(C_{\text{DOC in}} - C_{\text{SCR out}})}{C_{\text{DOC in}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η_{SDPF} 为SDPF载体的NO_x转化效率; η_{SCR} 为SCR载体的NO_x转化效率; η_{Total} 为SDPF和SCR载体的转化效率总和; $C_{\text{DOC in}}$ 为DOC上游入口的NO_x质量浓度; $C_{\text{SDPF out}}$ 为SDPF下游出口的NO_x质量浓度; $C_{\text{SCR out}}$ 为SCR系统下游出口的NO_x质量浓度。

1.2.3 化学反应机理

尿素喷射量是电子控制单元(ECU)通过DOC上游NO_x质量浓度按照反应方程进行控制的。尿素溶液进入排气管中发生水解热解,最终形成无污染的N₂和水^[10-11]。ECU闭环控制系统通过使用NO_x传感器来监测催化转化器下游的NO_x质量浓度,将其作为反馈信号提供给控制器,从而实现对尿素喷射量的实时调整^[12]。定义过喷系数(NSR)为实际喷射量与理论喷射量的比值,NSR大于1即为过喷,NSR越大说明实际尿素喷射量越大。

2 试验结果与分析

2.1 SCR载体尺寸对背压的影响

在工况1下,排气质量流量为540 kg/h、涡后温度为621℃时,测得的总排气背压和3组SCR系统背压如图3所示。由图3可以看出:采用1号SCR载体时,系统总排气背压和SCR系统背压最大,分别为65.0 kPa和24.7 kPa;采用3号SCR载体时,系统总排气背压和SCR系统背压最小,分别为54.1 kPa和10.3 kPa;采用2号SCR载体时,系统总排气背压和SCR系统背压分别为56.2 kPa和13.9 kPa。

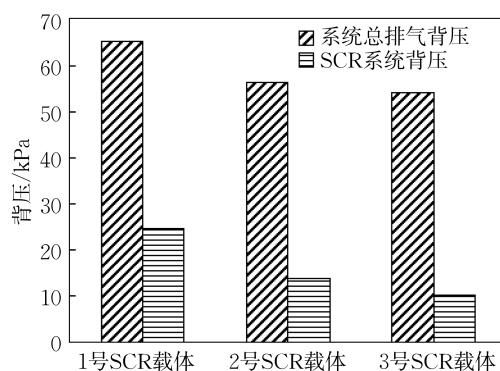


图3 不同SCR载体对背压的影响

对比1号SCR载体与2号SCR载体可以发现,相同载体直径下,长度越长背压越大。1号SCR载体比2号SCR载体长度增加33.3%,系统总排气背压和SCR系统背压分别增大了15.7%和77.7%。这主要是由于随着载体长度的增加,排气流量在SCR催化器中摩擦阻力增大。而3号SCR载体比2号SCR载体直径增加了21.5%,系统总排气背压和SCR系统背压分别降低了3.6%和25.8%。增大载体直径可以降低背压,主要是因为载体直径的增大会导致流体的流速分布更加均匀,减小了流体的摩擦阻力。此外,增大载体直径也会减小流体与管道壁之间的接触面积,降低了摩擦损失,因此增加载体直径是一个有效降低背压的措施。

2.2 SCR载体尺寸对NO_x转化效率的影响

在工况2下,进行了NO_x转化效率测试(NSR为1.2),结果见表4。由表4可知:排气质量流量提升到了390 kg/h左右,SDPF入口温度为450℃左右,总效率均达到99%以上,说明在排气温度处于高温区间时系统对NO_x转化效率较高,性能较好;同时3组方案的SDPF效率均达到了95%以上,说明绝大多数NO_x已被SDPF转化。对比SCR转化效率可以发现采用3号SCR载体的方案的各效率明显高于其他2组,这是因为3号SCR载体的直径最大,使气流更均匀、反应更充分;虽然1号SCR载体比2号SCR载体更长,但转化效率没有明显差异,说明2号SCR载体长度(152.4 mm)已经完全可以实现较高NO_x转化效率。

表4 工况2下NO_x转化效率(NSR为1.2)

SCR载体	排气质量 流量/(kg·h ⁻¹)	SDPF入口 温度/℃	C _{DOC in} /(g·m ⁻³)	C _{SDPF out} /(g·m ⁻³)	C _{SCR out} /(g·m ⁻³)	η _{SDPF} /%	η _{SCR} /%	η _{Total} /%
1号	391.9	458.1	2.0	9.5×10 ⁻²	9.6×10 ⁻³	95.40	89.90	99.50
2号	389.9	454.9	1.9	9.7×10 ⁻²	9.9×10 ⁻³	95.00	89.80	99.50
3号	386.2	458.1	1.8	8.8×10 ⁻²	3.6×10 ⁻³	95.20	95.90	99.80

2.3 不同尺寸SCR载体的储备转化效率对比

为了进一步探究不同体积SCR载体的NO_x转化效率提升能力(储备转化效率)差异,选取了2号SCR载体和3号SCR载体在工况3进行试验分析。此时排气质量流量280 kg/h以上、SDPF入口温度为280℃以上,达到了尿素起喷条件;DOC上游原排NO_x质量浓度在100 mg/m³左右,分别设置尿素NSR为1.1和1.2进行测试,测试结果如图4所示。由图4可以看出:提高尿素喷射量可以提高NO_x转化效率,采用2号SCR载体和3号SCR载体后,总效率都提高了8个百分点左右,提升幅度相近;但尿素NSR从1.1提升到1.2后,可以明显看出采用3号SCR载体的效率提升率(28.9%)是采用2号SCR载体的2倍,说明增大SCR载体直径可以显著提升SCR的储备转化效率。

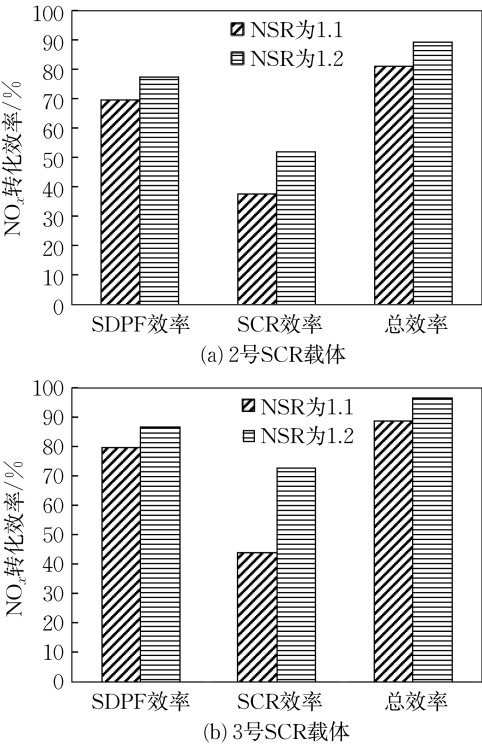


图4 不同NSR的NO_x转化效率

3 结论

利用发动机台架在某国六轻型柴油机上试验研究了不同SCR载体尺寸对后处理系统性能影响的差异,主要研究结论如下:

(1) SCR载体长度增加会导致后处理系统排气背压增大,而载体直径增加则会降低后处理系统排气背压,背压对载体长度尺寸的敏感性更强。

(2) 在高排温阶段,系统总体NO_x转化效率均超过99%,SCR载体长度增加并没有带来效率提升;相反,SCR载体直径的增加使气流更加均匀、反应更加充分,从而显著提升了SCR性能。

(3) 尿素达到起喷条件后,提高尿素喷射量可以明显提高NO_x转化效率,增大SCR载体直径可以显著提升储备转化效率。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国环境保护部. 中国移动源环境管理年报(2022)[R/OL]. (2022-12-07)[2023-12-01]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202212/t20221207_1007111.shtml.

[2] 中华人民共和国环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 18352.6—2016[S]. 北京:中国环境科学出版社,2020.

[3] DEMUYNCK J, FAVRE C, BOSTEELS D, et al. 超低氮氧化物排放的乘用车柴油机[J]. 汽车与新动力, 2021, 4(1):30-36.

[4] 楼狄明, 谭畅, 谭丕强, 等. DOC+CDPF+SCR对轻型柴油机排放特性的影响[J]. 车用发动机, 2019(2):16-21.

- [5] KIM P S, KIM Y J, KIM C, et al. 先进稀薄氮氧化物控制的超稳定后处理系统的开发[J]. 汽车与新动力, 2020, 3(2):53-60.
- [6] JOHANSEN K, BENTZER H, KUSTOV A, et al. Integration of vanadium and zeolite type SCR functionality into DPF in exhaust aftertreatment systems-advantages and challenges [C]// SAE 2014 World Congress & Exhibition. New York: SAE International, 2014.
- [7] 余国成, 王再兴, 刘屹. 柴油机双SCR系统结构参数优化试验研究[J]. 内燃机与配件, 2020(15):40-42.
- [8] 楼狄明, 决坤有, 房亮. 催化型颗粒物捕集器长度对其捕集性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(增刊1):39-42.
- [9] ZHENG G Y, WANG F, et al. Urea SCR system development for large diesel engines[C]// Commercial Vehicle Engineering Congress. New York: SAE International, 2014.
- [10] 苏威, 王志坚, 杨海龙, 等. 国六柴油机铜基催化剂劣化规律及评价[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(1):25-30.
- [11] 谭丕强, 段立爽, 楼狄明, 等. 柴油机选择性催化还原捕集技术(SDPF)的研究现状与发展趋势[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12):5495-5511.
- [12] 刘丙善, 吕林. 氮氧化物选择性催化还原开环控制技术误差分析[J]. 船海工程, 2007(4):71-73.



及时的汽车资讯 强大的数据库引擎 前沿技术剖析 全网平台覆盖

汽车与新动力
AUTOMOBILE AND NEW POWERTRAIN
www.qcyxdl.cn
您的技术综合服务平台

邮箱 qcyxdl@126.com
电话 021-25079193
地址 上海市杨浦区军工路2500号

主管单位 上海汽车集团股份有限公司 支持单位 上海机动车检测认证技术研究中心有限公司
主办单位 上汽大通汽车有限公司 上海汽车集团股份有限公司商用车技术中心
上海内燃机研究所有限责任公司 同济大学