

双级串联 DOC+POC 柴油机排放特性研究

熊兴旺, 高俊华

(中国汽车技术研究中心, 北京 100176)

Study on Emission Characteristics of Diesel Engine with Two Groups of DOC+POC in Series

XIONG Xingwang, GAO Junhua

(China Automotive Technology & Research Center, Beijing 100176, China)

Abstract: In order to meet the requirement of the Special Beijing Phase V Standard on the number of particulate matter, hot world harmonized transient cycle (WHTC) tests were conducted on a China IV diesel engine fueled with China V diesel fuel. Gaseous and particulate matter emissions from the engine with one single group of diesel oxidation catalyst(DOC) +particulate oxidation catalyst(POC) and with two groups of DOC+POC in series were compared with those from the engine without after-treatment. The results show that compared with the results without after-treatment, particulate matter and particulate number with one single group of POC + DOC are reduced by 63% and 23% respectively, while those with two groups of POC+DOC in series are reduced by 74% and 79% respectively. Two-groups of POC+DOC in series do not make the transient particulate number exceed the one without after-treatment as one single group of DOC+POC does. Equipped with two groups of DOC+POC in series, the emissions from the engine even fueled with China III diesel fuel are equivalent to those fueled with China V diesel fuel, which means that the usage of two groups of DOC+POC in series can overcome the adverse effects of fuel of worsened quality on pollution.

摘要: 为了应对“特京五”对颗粒物数目的要求,在一台满足国IV标准柴油机上,以国V柴油原排试验结果为基准,对一组氧化型催化器(DOC)+微粒氧化催化转化器(POC)后处理和两组DOC+POC后处理串联时热态全球统一瞬态循环(WHTC)的气态污染物和颗粒物排放结果进行了对比研究。结果表明:单组DOC+POC的净化能力为颗粒物质量降低63%,颗粒物数目降低23%;两组DOC+POC串联可使颗粒物质量降低74%,颗粒物数目降低79%,并可以避免一组DOC+POC方案时颗粒物数量浓度瞬时排放超过原排的现象。采用两组DOC+POC串联方案时,燃用国III柴油的排放结果与国V柴油的排放结果基本持平,表明两组DOC+POC串联后处理方案可以克服燃油品质变差对颗粒物排放带来的不利影响。

关键词: DOC+POC; WHTC 循环; 颗粒物; 颗粒物数量浓度

Key words: DOC+POC; WHTC cycle; particulate matter; particulate number

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2017.06.007

中图分类号: TK421+.5

文献标识码: A

0 概述

重型柴油机排放是大气PM_{2.5}污染的一个重要来源,中国排放法规对重型柴油机颗粒物排放的

限制日趋严格,北京地区的法规要求更高。目前已经实行的京V^[1](被称为“特京五”)标准在《北京市环境保护局关于重型车排放控制有关规定的通知》中加入了颗粒物数目要求,日前发布的《重型车用压

收稿日期: 2016-06-10

作者简介: 熊兴旺(1989—),男,硕士生,工程师,主要研究方向为天然气掺氢发动机、柴油机建模, E-mail: xiongxingwang@126.com。

燃式、气体燃料点燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法 北京第Ⅵ阶段》意见征求稿也对重型柴油机排气颗粒污染物水平做了严格限定。

柴油机颗粒物排放和氮氧化物排放存在此消彼长(trade-off)的关系,单纯依靠机内净化已经很难满足越来越严格的排放法规要求,排气后处理装置的应用越来越广泛。单独柴油机氧化催化器(DOC)^[2-4]、DOC+柴油机微粒捕集器(DPF)^[5]、DPF+DPF^[6]组合及单独 POC、单组 DOC+POC 组合^[7-8]的方式都可以明显净化柴油机一氧化碳(CO)、碳氢化合物(THC)、颗粒物(PM)质量和颗粒物数量浓度(PN)等排放。DOC+POC 对生物柴油发动机排放物也有一定的净化作用^[9-10]。另有研究表明,发动机原机、一组 DOC+POC 和两组 DOC+POC 串联三种后处理方案的 PM 和 PN 排放有较好的相关性,且 WHTC 冷态循环和热态循环 PN 排放差异很小^[11]。

单组 DOC+POC 对排气污染物的净化能力有限,为了探讨两组 DOC+POC 串联对发动机排放的净化能力及对油品的适应性,本文以国Ⅳ柴油机不带后处理的 WHTC 热态循环试验的排放结果为基准,使用国Ⅴ柴油对比研究了一组 DOC+POC 和两组 DOC+POC 串联后处理方案的排放特性,并对比研究了两组 DOC+POC 串联方案中使用国Ⅲ柴油与使用国Ⅴ柴油的排放特性。

1 试验系统与方案

1.1 试验发动机

本文发动机为采用废气再循环(EGR)+DOC+POC 技术路线满足国Ⅳ排放法规的 4 冲程高压共轨增压中冷柴油机,表 1 给出了试验用发动机的性能参数。

表 1 试验柴油机性能参数

项目	参数
型式	直列,水冷,四冲程
进气方式	增压中冷
气缸数	4
供油系统	高压共轨
总排量/L	2.8
标定功率/kW	87(3 200 r/min)
最大扭矩/(N·m)	260

1.2 试验设备

试验采用交流电力测功机,并使用全流排放测试系统进行气态污染物和颗粒物质量排放测量,颗粒物数目排放由 AVL 489 颗粒计数器测量,表 2 给出了试验中所用的关键设备。

表 2 主要测试仪器及设备

设备名称	型号	生产厂家
交流电力测功机	DynoRoad 204/8 Se	AVL
气态污染物分析仪	AMA i60	AVL
全流稀释系统	CVS i60	AVL
颗粒物(PM)设备	PSS i60	AVL
颗粒物(PN)设备	AVL489	AVL
进气空调	CONSYSAIR-1600	AVL

1.3 试验用油

表 3 给出了试验过程中所用国Ⅲ和国Ⅴ柴油的关键理化特性指标。

表 3 国Ⅲ柴油和国Ⅴ柴油对比

项目	参数	
燃油	国Ⅲ柴油	国Ⅴ柴油
密度/(kg·m ⁻³)	832.3	804.9
十六烷值	51.6	54.0
硫含量/10 ⁻⁶	323	10
多环芳烃质量分数/%	7.3	3.5

1.4 试验方案

依据标准 DB 11/964—2013 进行 WHTC 热态循环试验。先将发动机后处理器拆除,燃用国Ⅴ柴油进行原排试验,然后再分别使用一组 DOC+POC 后处理和两组 DOC+POC 后处理串联进行排放试验,最后燃用国Ⅲ柴油进行了两组 DOC+POC 后处理串联方案的排放试验。为了避免不同的试验条件对结果产生干扰,每次试验前均在标定功率点将排气背压、中冷后进气温度等试验条件调整一致,在整个试验过程中不对发动机 ECU 数据进行任何改动。

图 1 给出了 WHTC 循环试验中各工况点转速和转矩。

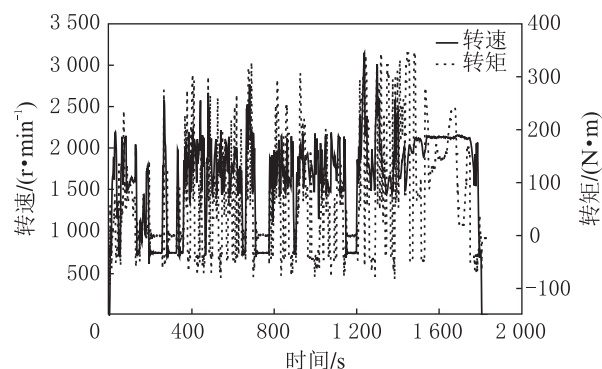


图 1 WHTC 循环试验各工况转速和转矩

2 试验结果分析

2.1 两种后处理方案各污染物排放对比

表 4 给出了发动机燃用国Ⅴ柴油,在热态 WHTC

循环中不带后处理(原排)、带一组 DOC+POC 和两组 DOC+POC 的各种污染物的比排放量。

表 4 发动机带不同后处理的比排放

污染物	比排放		
	原排	一组 DOC+POC	两组 DOC+POC
CO ₂ 排放/ (g · (kW · h) ⁻¹)	760.8	762.6	774.8
CO 排放/ (g · (kW · h) ⁻¹)	4.128	0.077	0
NO _x 排放/ (g · (kW · h) ⁻¹)	3.206	3.322	3.123
THC 排放/ (g · (kW · h) ⁻¹)	2.049	0	0
PM 排放/ (g · (kW · h) ⁻¹)	0.121 0	0.044 9	0.031 1
PN 排放/ (kW · h) ⁻¹	1.34 × 10 ¹⁴	1.03 × 10 ¹⁴	2.79 × 10 ¹³

以原排 WHTC 循环试验的各污染物排放值为基准,将一组 DOC+POC 和两组 DOC+POC 串联时的发动机各污染物的比排放值分别与原排进行了对比,见图 2。

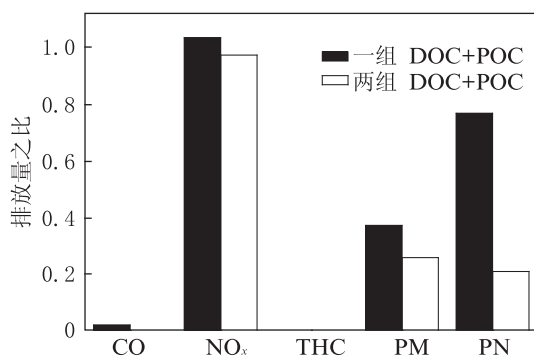


图 2 两种后处理方案比排放对比

从图 2 可以看到一组 DOC+POC 可以非常明显的降低 THC、CO、PM 和 PN 排放:在 NO_x 排放略有升高(4%)的情况下,CO 减少 98%,THC 降低 100%,颗粒物质量和颗粒物数量排放可以分别降低 63%和 23%。而两组 DOC+POC 串联可以进一步降低 PM 和 PN 排放:在 NO_x 排放降低 3%的同时,CO 和 THC 排放均降低 100%,颗粒物质量和颗粒物数量排放分别降低 74%和 79%。

发动机排气流经 DOC 时^[12-13],在催化剂的作用下,CO、THC 和颗粒物中的部分可溶性有机物(SOF)可以在较低温度下氧化为水(H₂O)和二氧化碳(CO₂),同时排气中的一氧化氮(NO)可以转化为二氧化氮(NO₂)。NO₂是一种活性很强的氧化剂,在 POC 中将颗粒物氧化成 CO₂,并同时部分 CO、THC 氧化,而 NO₂被还原为 NO。表 4 中的 CO₂比

排放结果表明排气经过 DOC+POC 后,CO₂比排放升高,CO、THC、PM 比排放和 PN 下降,NO_x比排放基本没有变化也印证了上述反应的发生。

研究发现,NO 转化为 NO₂ 在高于 250 °C 时发生,在 360 °C~380 °C 时 NO 转化为 NO₂ 的量达到最大值,当温度超过 380 °C 的时候,转化效率反而会有所降低^[14-15]。

图 3 为 WHTC 循环试验中的瞬时排气温度曲线。可以看到,试验全程排气温度随工况变化而在 100 °C~460 °C 范围内剧烈变化,在 1 200 s 之前存在大量排温低于 250 °C 的工况点,排温处于 360 °C~380 °C 区间内的工况点更少。这造成一组 DOC+POC 方案和两组串联 DOC+POC 方案中第一级 DOC+POC 入口排气温度相对较低,NO₂生成量有限,CO、PM 氧化反应并未进行完全。流经第二级 DOC+POC 的排气,在某些工况下 DOC 的入口温度比第一级 DOC 入口温度可能略有降低^[16-17],NO₂生成量可能比第一级 DOC 中的生成量略有减少,但是流经第二级 DOC+POC 的 CO、THC、PM 已经得到较大程度的净化,所以 NO₂ 的浓度与 CO、THC、PM 的浓度之比得到了较大提升,残余 CO、THC、PM 更容易在第二级 DOC+POC 中被氧化,排气得到进一步净化。同时,流经第二级 DOC+POC 也相当于为氧化反应提供了更充分的反应时间。总体来说,两组 DOC+POC 与一组 DOC+POC 相比,净化 CO、THC、PM 的优势在于更有利的反应条件和更充分的反应时间。

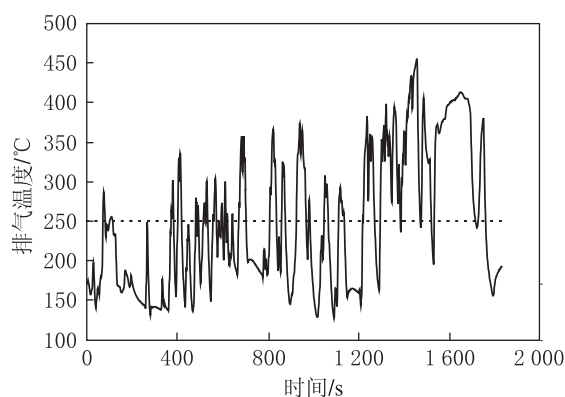


图 3 WHTC 循环试验中排温曲线

2.2 颗粒物瞬时数量浓度异常排放结果分析

图 4 给出了一组 DOC+POC 方案与原排瞬时颗粒物数量浓度排放之比。从图 4 中整体上可以看到,一组 DOC+POC 方案 PN 瞬时排放浓度相对于原排有部分改善,但在部分工况数量浓度却超过原排,一组 DOC+POC 整个循环过程有大约 30% 的时

间排放浓度高于原排。在个别工况点一组 DOC+POC 方案与原排的 PN 排放比值甚至出现了 10 多倍、20 多倍的瞬时峰值,虽然峰值持续时间很短,但是仍会对整体排放造成较大影响。文献[14]在稳态工况下 POC 后也观察到存在类似的颗粒物异常排放情况,并且推算出尖峰瞬时排放量较大会严重削弱 POC 对于颗粒物的整体处理效果。

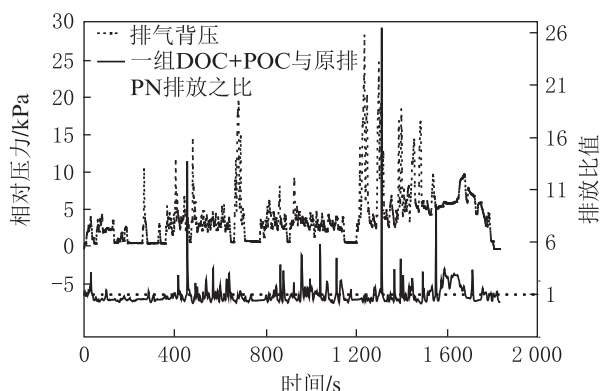


图 4 一组 DOC+POC 时的排气背压及其 PN 瞬时排放与原排之比

PN 异常升高工况点的出现可能主要有两方面原因:一是由于出现异常之前的工况点对应的排气温度过低,导致流经 DOC 的排气中 NO_2 生成量有限,一些被 POC 捕集到的颗粒物未能充分氧化,在 POC 中积累下来;另外,从图 4 中可以看到,PN 异常升高工况点出现之前的工况点都存在排气背压的快速剧烈波动,这导致被捕集而未能充分反应的颗粒物重新被“吹出”POC,在尾气中造成瞬时颗粒物数量浓度排放突然升高。综上,一组 DOC+POC 方案中,如果既存在排温较低的工况也存在排气背压快速剧烈波动的工况,则很可能会造成 PN 瞬时排放较原排异常升高的现象。

图 5 给出了两组 DOC+POC 串联与原排的 PN 瞬时浓度排放之比。从图 5 可以看出,两组 DOC+POC 串联的 PN 瞬时排放浓度得到了明显改善,循环全程瞬时排放浓度都低于原排瞬时排放浓度。一组 DOC+POC 方案中的 PN 异常升高和瞬时峰值在两组 DOC+POC 方案中也被削平,整个循环过程中所有工况点的瞬时排放浓度最大不超过原排对应工况点瞬时排放浓度的 75%。这表明第二级 DOC+POC 可以将第一级 POC 中“吹出”的颗粒物进行二次净化,避免出现瞬时 PN 排放超过原排的现象。由此可见,在瞬态法规循环试验中,两组 DOC+POC 串联方案在净化颗粒物数量浓度排放方面具有明显优势。

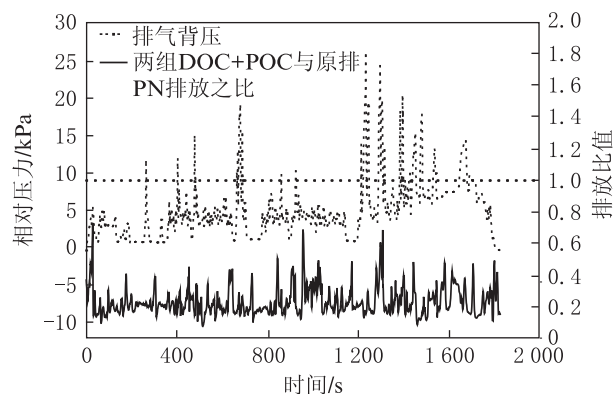


图 5 两组 DOC+POC 时的排气背压及其 PN 瞬时排放与原排之比

2.3 双 DOC+POC 方案国Ⅲ与国Ⅴ柴油排放对比

研究表明,柴油品质会对柴油机的排放有较大影响^[18-19]。为了观察不同燃油对于两组 DOC+POC 串联后减排能力的影响,采用国Ⅲ柴油进行了相同的 WHTC 循环试验。选定国Ⅴ原排的排放结果作为基准,两组 DOC+POC 串联后,发动机燃用国Ⅲ柴油和燃用国Ⅴ柴油的排放结果分别与基准排放结果做比较,结果如图 6 所示。

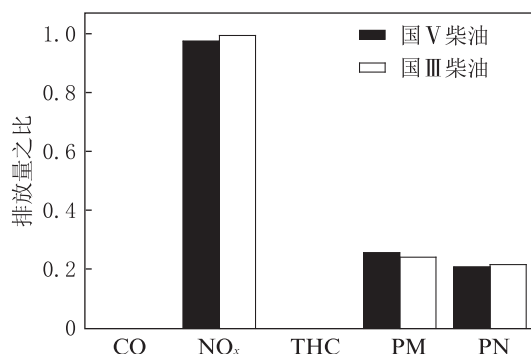


图 6 两组 DOC+POC 国Ⅲ与国Ⅴ柴油比排放对比

可以看到,两组 DOC+POC 串联后,燃用国Ⅲ柴油相对于国Ⅴ柴油,发动机各污染物排放基本持平:CO 排放与 THC 排放都为 0,国Ⅲ柴油的 NO_x 排放与 PN 排放比国Ⅴ柴油均高出约 2%,PM 排放低约 1%。无论燃用国Ⅲ还是国Ⅴ柴油,两组 DOC+POC 串联后处理方案的 CO、THC、PM 和 PN 排放物相对于原机燃用国Ⅴ柴油时的排放都大幅降低。可见,两组 DOC+POC 后处理串联的方案可以克服燃油品质变差对排放带来的不利影响。

3 结论

(1) 两组 DOC+POC 串联方案与一组 DOC+POC 方案相比,颗粒物排放净化效率更高,对于颗粒物数量排放的净化优势尤其明显。

(2) 两组 DOC+POC 串联方案可以避免一组 DOC+POC 方案中存在的瞬时 PN 排放相对于原排放异常升高的现象。

(3) 采用两组 DOC+POC 串联方案后,燃用国Ⅲ柴油时各污染物比排放值和燃用国Ⅴ柴油时的比排放值基本持平,两组 DOC+POC 串联的方案可以克服燃油品质变差对于排放带来的不利影响。

参考文献:

- [1] 北京市环境保护局. 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(台架工况法): DB 11/964—2013[S]. 北京:[出版者不详], 2013.
- [2] 王军方, 丁焰, 尹航, 等. DOC 技术对柴油机排放颗粒物数浓度的影响[J]. 环境科学研究, 2011, 24(7): 711-715.
WANG J F, DING Y, YIN H, et al. Effects of DOC technology on particle number concentration emissions by diesel engines[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(7): 711-715.
- [3] 葛蕴珊, 赵伟, 王军方, 等. DOC 对柴油机排放特性影响的研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(5): 460-464.
GE Y S, ZHAO W, WANG J F, et al. Effects of diesel oxidation catalyst on emission from diesel[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(5): 460-464.
- [4] 楼狄明, 林浩强, 谭丕强, 等. 氧化催化转化器对柴油机颗粒物排放特性的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 888-893.
LOU D M, LIN H Q, TAN P Q, et al. Effects of diesel oxidation catalyst technology on characteristics of particle from a diesel engine [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(6): 888-893.
- [5] LAKKIREDDY V, MOHAMMED H, JOHNSON J, et al. The effect of a diesel oxidation catalyst and a catalyzed particulate filter on the emissions from a heavy duty diesel engine[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2006, 2006-01-0875.
- [6] ZHANG J, TIAN G, XU H, et al. The application of two closely coupled DPFs as the after-treatment system[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2010, 2010-01-1939.
- [7] 赵思博, 孙平, 胡俊, 等. DOC+POC 对柴油机尾气排放的影响研究[J]. 机械设计与制造, 2014(10): 246-249.
ZHAO S B, SUN P, HU J, et al. Study on influence of DOC+POC on exhaust emissions of diesel engine [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(10): 246-249.
- [8] 马志豪, 任源, 李磊, 等. DOC、POC 对柴油机气体排放的影响[J]. 小型内燃机与摩托车, 2013, 42(2): 59-63.
MA Z H, REN Y, LI L, et al. The effects of POC and DOC on the gas emissions of diesel engine [J]. Small Interanal Combustion Engine and Motorcycle, 2013, 42(2): 59-63.
- [9] 姚笛, 楼狄明, 谭丕强, 等. 基于生物柴油发动机的不同后处理装置颗粒物数量排放特性[J]. 内燃机工程, 2014, 35(1): 8-12.
YAO D, LOU D M, TAN P Q, et al. Particle number emission characteristics of biodiesel engine equipped with different after-treatments [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(1): 8-12.
- [10] MURTONEN T, AAKKO-SAKSA P, KURONEN M, et al. Emissions with heavy-duty diesel engines and vehicles using FAME, HVO and GTL fuels with and without DOC+POC aftertreatment[J]. SAE Int. J. Fuels Lubr. 2010, 2(2): 147-166.
- [11] 葛旻, 王凤滨, 尹超, 等. 基于法规的柴油发动机颗粒物数量排放测试研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(12): 1378-1381.
GE Y, WANG F B, YIN C, et al. A study on the regulation-based measurement of particulate number emission of diesel engines[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(12): 1378-1381.
- [12] 周敏. 重型柴油机颗粒捕集器再生特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [13] 高新文. DOC+POC 在直列泵柴油机上的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [14] 冯向宇. 柴油机排气后处理系统应用的关键科学问题研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [15] MAJEWSKI W A, AMBS J L, BICKEL K. Nitrogen oxides reactions in diesel oxidation catalyst[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 950374, 1995.
- [16] 田茂军, 朱红国, 黄德军, 等. 前置 DOC 对 SCR 系统柴油机 NO_x 排放的影响[J]. 车用发动机, 2015(4): 80-84.
TIAN M J, ZHU H G, HUANG D J, et al. Effect of pre-DOC on NO_x emission for SCR diesel engine [J]. Vehicle Engine, 2015(4): 80-84.
- [17] 刘洋, 孙亮, 白书战, 等. DOC/POC/SCR 组合后处理技术在非电控柴油机排放上的应用研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(1): 18-22.
LIU Y, SUN L, BAI S Z, et al. Study on emission characteristics of non-electronically controlled diesel engine with DOC/POC/SCR combined system [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(1): 18-22.
- [18] 尹超, 王凤滨, 李腾腾, 等. 燃用较差油品对国五 SCR 柴油机性能和排放影响的试验研究[J]. 汽车工程, 2014, 36(8): 940-943.
YIN C, WANG F B, LI T T, et al. An experimental study on the effects of lower-grade fuel on the performance and emission of a state-V SCR diesel engine [J]. Automotive Engineering, 2014, 36(8): 940-943.
- [19] 陈文森, 王建昕, 帅石金, 等. 柴油品质对发动机排放性能的影响[J]. 汽车工程, 2008, 30(8): 657-663.
CHEN W S, WANG J X, SHUAI S J, et al. The effects of fuel properties on diesel engine emissions [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(8): 657-663.