

矿用防爆柴油机四元组合式尾气后处理系统设计及性能试验

张磊¹, 唐彬展¹, 鲍久圣¹, 胡志伟², 彭振¹, 胡德平³, 阴妍¹, 袁晓明⁴

(1. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏徐州 221116; 2. 山西西山晋兴能源有限责任公司斜沟煤矿, 山西吕梁 033602; 3. 徐州徐工重型车辆有限公司, 江苏徐州 221112; 4. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司, 山西太原 030006)

摘要: 防爆柴油机是矿井辅助运输车辆使用最为广泛的动力源之一, 受防爆改造以及井下恶劣环境的影响, 导致其尾气污染问题严重, 有悖于绿色矿山发展战略。煤矿井下自2020年12月开始实施非道路国III排放标准, 但现阶段矿用防爆柴油机尾气净化多采用机内前处理技术, 无法满足非道路国IV及更高标准的排放要求。针对防爆柴油机尾气污染严重及净化技术滞后的问题, 设计了一种新型四元组合式尾气后处理系统, 并通过仿真和台架试验开展了关键部件结构参数优化及尾气污染物净化性能研究。首先, 按照煤矿井下防爆要求, 超前面向非道路国IV尾气排放标准, 设计了一种由氧化催化剂(DOC)、颗粒捕集器(DPF)、选择性催化还原器(SCR)和防爆温控装置(EPTC)组成的防爆柴油机四元组合式尾气后处理系统; 采用STAR-CCM+仿真软件对防爆温控装置结构进行传热分析, 结果表明: 管壁面温度均小于150℃, 可满足煤矿安全规程防爆要求。其次, 以某型60 kW防爆柴油机为研究对象, 基于GT-Power软件分别搭建了DOC、SCR和DPF后处理部件的仿真模型, 并对其关键结构参数及净化性能开展正交试验进行优化, 确定了尾气后处理系统关键部件的最优结构参数, 得到如下规律: 污染物的净化效率随DOC和SCR的载体直径、载体长度和通道密度的增大而提高; 载体长度和载体直径对DPF捕集效率与DOC和SCR规律一致, 而DPF因其特殊的壁流式载体结构, 随着通道密度增加, PM颗粒物的捕集效率可始终维持在96%附近。在此基础上, 建立了防爆柴油机和后处理系统的耦合模型, 开展了防爆柴油机尾气排放污染物净化效率、动力性与经济性仿真试验。最后, 研制了四元组合式尾气后处理系统样机并开展台架试验, 将试验数据与仿真数据对比分析, 结果表明: 尾气后处理系统对CO、NO、HC与颗粒物的净化效率分别大于95%、90%、83%以及95%, 可满足非道路国IV排放要求; 加装尾气后处理系统的防爆柴油机整体输出扭矩平均下降4.83%, 整体燃油消耗率平均增加1.19%, 对防爆柴油机的动力性与经济性的实际影响较小。

关键词: 防爆柴油机; 尾气后处理; “四元”组合式; 参数优化; 非道路国IV

中图分类号: TD52 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)05-2547-14

Design and performance test of four elements combined exhaust aftertreatment system for mine explosion-proof diesel engine

收稿日期: 2023-02-15 修回日期: 2023-04-13 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0190

基金项目: 徐州市重点研发计划资助项目(KC22419); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX23_2511); 中国矿业大学未来科学家计划资助项目(2023WLKXJ092)

作者简介: 张磊(1994—), 男, 山西大同人, 博士研究生。E-mail: machinezl@cumt.edu.cn

通讯作者: 鲍久圣(1979—), 男, 安徽桐城人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: cumtbjs@cumt.edu.cn

引用格式: 张磊, 唐彬展, 鲍久圣, 等. 矿用防爆柴油机四元组合式尾气后处理系统设计及性能试验[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2547-2560.

ZHANG Lei, TANG Binzhan, BAO Jiusheng, et al. Design and performance test of four elements combined exhaust aftertreatment system for mine explosion-proof diesel engine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2547-2560.



移动阅读

ZHANG Lei¹, TANG Binzhan¹, BAO Jiusheng¹, HU Zhiwei², PENG Zhen¹, HU Deping³,
YIN Yan¹, YUAN Xiaoming⁴

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Xiegou Mine, Shanxi XiShan Jinxin Energy Co., Ltd., Lüliang 033602, China; 3. Xuzhou XCMG Heavy Vehicle Co., Ltd., Xuzhou 221112, China; 4. CCTEG Taiyuan Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Explosion-proof diesel engine is one of the most widely used power sources for auxiliary transportation vehicles in coal mines at present. It is affected by explosion-proof transformation and harsh underground environment, resulting in serious exhaust pollution, which is contrary to the green mine development strategy. The emission standard of Non-road National Stage III has been implemented in coal mine since December 2020, but at the present stage, the exhaust gas purification of explosion-proof diesel engines for mining uses the internal pretreatment technology, which cannot meet the emission requirements of the Non-road National Stage IV and higher standards. Aiming at the problems of serious exhaust pollution and lagging exhaust purification technology, a four-element combined exhaust aftertreatment system was designed. Through simulation and bench test, the structural parameters optimization of key components and the purification performance of exhaust were studied. First of all, according to the explosion-proof requirements of underground coal mines, a four-element combined exhaust aftertreatment system of explosion-proof diesel engine composed of Diesel Oxidation Catalyst (DOC), Diesel Particulate Filter (DPF), Selective Catalyst Reduction (SCR), and Explosion-proof & Temperature Control device (EPTC) was designed, which exceeds the Non-road National Stage IV standard. The heat transfer analysis of EPTC device structure was carried out through the STAR-CCM+ software. The results show that the pipe wall temperature is less than 150°C, which could meet the explosion-proof requirements of coal mine safety regulations. Then, taking a 60 kW explosion-proof diesel engine as the research object, the simulation models of DOC, SCR and DPF aftertreatment components were built based on the GT-Power software. The key structural parameters and purification performance of the aftertreatment system were optimized by orthogonal test, and the optimal structural parameters of the key components were determined, and the following rules were obtained. The purification efficiency of pollutants increases with the increase of carrier diameter, carrier length and channel density of DOC and SCR. The effect of carrier length and diameter on the capture efficiency of DPF is consistent with the laws of DOC and SCR. Due to the special wall flow carrier structure of DPF, the capture efficiency of PM particles can always be maintained around 96% as the channel density increases. On this basis, the coupling model of the explosion-proof diesel engine and the aftertreatment system was established, and the simulation test of purification efficiency, power and economy of exhaust pollutants from explosion-proof diesel engine was carried out. Finally, a prototype of exhaust aftertreatment system was developed and bench test was carried out. The purification efficiency of the system for CO, NO, HC and particulate matter is greater than 95%, 90%, 83% and 95% respectively, which could meet the requirements of the Non-road National Stage IV standard. The overall output torque of explosion-proof diesel engine equipped with exhaust aftertreatment system decreased by 4.83% on average, and the overall fuel consumption rate increased by 1.19% on average, which had little impact on the power and economy of explosion-proof diesel engine.

Key words: explosion-proof diesel engine; exhaust aftertreatment; four elements combined; parameter optimization; Non-road National stage IV

防爆柴油机以压缩比高、输出功率大、动力性强等优点,成为煤矿井下无轨胶轮车、单轨吊等辅助运输车辆的主要动力源之一,在煤矿生产中发挥着至关重要的作用^[1-2]。2020-12-28,生态环境部正式批准发布《非道路柴油移动机械污染物排放控制技术要求(发布稿)》^[3],规定了第四阶段非道路柴油移动机械及其装用的柴油机污染物排放控制技术要求,并明确非道路柴油机自2022年12月起实施国IV排放标准。据此估计,煤矿井下防爆柴油机将于2025年前后开

始实施非道路国IV排放标准。

为满足煤矿井下的特殊环境和防爆要求,防爆柴油机在普通柴油机的结构基础上,增加了进/排气阻火器、水洗箱等防爆部件,增加了进排气阻力,使发动机进气量减少,排气严重受阻,缸内燃烧恶化^[4],导致防爆柴油机排放性能劣化^[5],不仅有悖于国家“双碳”战略和“绿色”矿山发展导向,而且也无法满足数年后即将在煤矿实施的非道路国IV排放要求。

柴油机尾气污染物成分主要包括:CO、HC、NO_x、

碳烟颗粒物等,为消除或净化这些污染物,目前国内外主流高压共轨柴油机多采用“三元”催化尾气后处理工艺^[6],其由氧化催化器(DOC)、颗粒捕集器(DPF)与选择性催化还原器(SCR)三大部件组成,可满足非道路国IV排放要求。

在国外因欧盟排放法规(欧V)十分严苛,不仅对尾气污染物排放限值要求极高,还规定尾气后处理系统必须具有排放控制策略与故障诊断等功能,因此国外多集中于常规道路柴油机智能控制策略的研究,例如JOONSOO等^[7]针对共轨直喷式柴油机SCR部件,开发了尿素喷射控制策略,提高了对NO_x的还原率;FERDINANDO等^[8]构建了基于神经网络预测模型的柴油机尾气净化控制策略,通过实时预测柴油机排气颗粒尺寸来调节SCR的尿素喷射情况,进而保证尾气净化效率;TAE等^[9]针对瞬态循环工况设计了一种SCR热管理控制策略,其通过控制柴油机废气处理液剂量来提高废气温度,保证了SCR还原反应的效率。而因国外矿山装备智能化水平发展不足,因此对于煤矿井下非道路防爆柴油机尾气净化技术的研究较少。

在我国煤矿井下防爆柴油机领域,由于现行排放标准仍处于非道路国III阶段,严重滞后于包括工程机械、农业机械在内的其他领域非道路柴油机,导致当前所采用的尾气净化技术以电控燃油喷射、废气再循环(EGR)与增压水冷等机内净化前处理技术为主,少数采用DOC+DPF尾气净化后处理技术。如:范江鹏^[10]设计了一种“防爆柴油电控燃油喷射+防爆水洗箱”的尾气净化技术路线,在减少了尾气污染物的排放量的同时实现了消焰降温的要求;王晓等^[11]针对高压共轨防爆柴油机设计了一种防爆柴油机废气再循环尾气净化技术,通过将部分废气经EGR阀进入进气系统重新参与燃烧过程,进而降低了燃烧时的最高温度,抑制了污染物生成;张翠平等^[12]研究了DOC/CDPF对防爆柴油机性能的影响,为其在防爆柴油机应用提供了理论参考。但以上研究均局限于满足现行国III排放标准,即无法满足非道路国IV标准对于HC、NO_x与PM污染物排放限值的要求,也无法解决由此带来的高反应温度(200~350℃)与尾气后处理系统外壳低表面温度(150℃)之间的矛盾。

针对当前研究不足,为解决井下防爆柴油机尾气污染问题,保护井下人员身心健康,面向非道路柴油机国IV排放标准,提出了防爆柴油机四元组合式尾气后处理工艺^[13],开展尾气后处理系统结构参数设计,并通过仿真与台架试验对尾气后处理系统的尾气净化性能以及加装尾气后处理系统对防爆柴油机动力性与经济性的影响进行研究,以期对矿用防爆柴油机

更高标准尾气净化技术的发展及应用提供参考。

1 防爆柴油机尾气后处理系统设计

防爆柴油机尾气后处理方法可借鉴采用道路柴油机尾气后处理技术,但是在技术工艺上有更高更难点的要求。根据《煤矿安全规程》规定:防爆柴油机任何一处的表面温度不得超过150℃,排气出口温度不得超过77℃^[14]。然而,DOC、SCR、DPF等尾气后处理单元通常需要高温反应环境,在高负荷时其表面温度及排气温度均远高于防爆要求值。因此,如何在满足煤矿井下苛刻温度控制要求的前提下,高效、准确地通过各种物理化学反应来净化处理尾气污染物,就成为防爆柴油机尾气净化处理技术的关键所在。

1.1 尾气后处理系统三元催化反应模型原理

为降低防爆柴油机尾气污染物的排放量,本研究采用现行道路车辆柴油机广泛使用的“DOC+DPF+SCR”三元催化尾气后处理工艺作为系统的基本反应模型,其模型反应原理与化学反应式如图1所示。其中,DOC主要由壳体、衬垫、载体和催化剂组成^[15],其可通过贵金属涂层上的堇青石等催化剂,将尾气中的CO和HC转化为无害的CO₂与H₂O排出;DPF通过物理捕集的方式净化尾气中的PM颗粒物,为避免颗粒物沉积堵塞颗粒捕集器,可通过多种主、被动DPF再生技术清除沉积物,保证捕集效果^[16];SCR系统由尿素箱、尿素供给与喷射单元、电控单元等部分组成,目前以氨(NH₃)为还原剂的Urea-SCR系统最为成熟,通过还原反应将NO_x转化为无污染的N₂,从而达到净化尾气的作用。将该技术应用于煤矿井下,可弥补加装防爆组件带来的进排气效果不佳的问题^[17]。

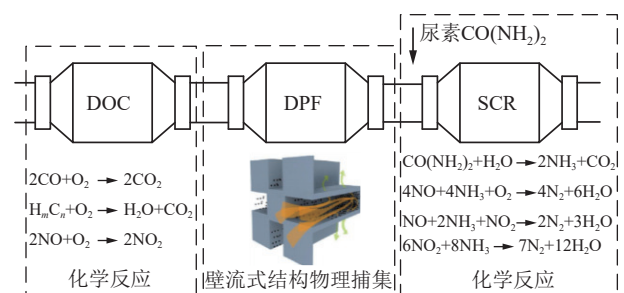


图1 柴油机三元催化反应模型

Fig.1 Three way catalytic reaction model of diesel engine

1.2 防爆温控装置设计

为解决尾气后处理单元高反应温度需求与煤矿井下对防爆柴油机低表面温度及排气温度要求之间的矛盾,在传统“三元”催化处理的结构基础上设计了第四元“防爆温控装置”(Explosion-Proof & Temperature Control device, EPTC),主要由防爆水冷结构(图2)、

水冷温控循环系统 (图 3) 与防爆废气水洗箱 3 部分组成。

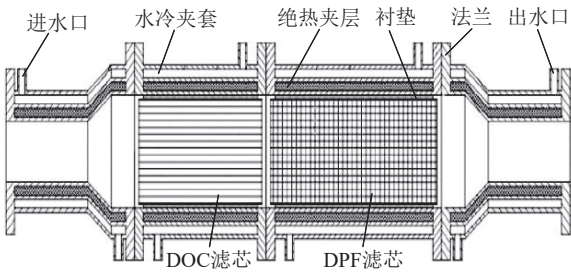


图 2 防爆水冷结构

Fig.2 Structure of explosion-proof & water cooled device

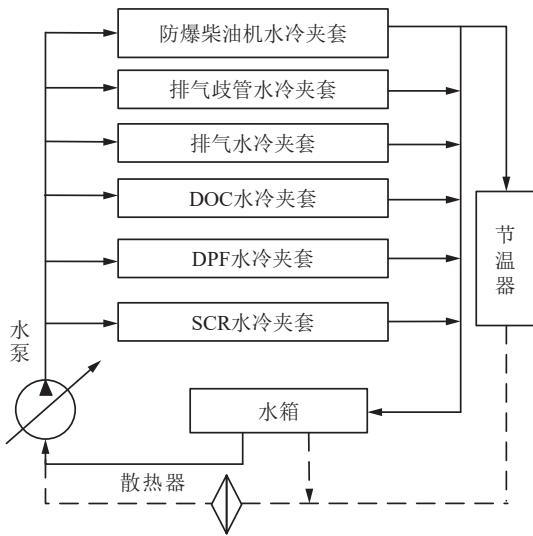


图 3 水冷温控循环系统

Fig.3 Water-cooled & temperature control circulating system

如图 2 所示, 防爆水冷结构安装在尾气后处理系统的壳体上, 采用水冷夹套与绝热夹层的组合形式, 可在保证尾气后处理系统内部反应温度的同时, 有效降低外部壳体表面温度, 使其满足低于 150 °C 的要求。

如图 3 所示, 为保证尾气后处理系统水冷效果, 在防爆柴油机原有单循环水冷结构^[18]的基础上, 将水循环管路连接至 DOC、DPF 与 SCR 的水冷夹套中组合成为水冷温控循环系统, 节温器可根据检测到的冷却水温度, 实时调节开度进而调节流经散热器支路的进水量, 最终实现防爆控温目的。

为验证防爆水冷结构设计合理性, 引入计算流体力学 (CFD) 分析方法, 通过 STAR-CCM+仿真软件进行传热分析。

因绝热夹层的设计目的是减小冷却水对内部反应温度的影响, 在仿真过程将绝热夹层与水冷夹套内壁直接等效为一个壁面, 不仅可直观反映防爆水冷结构的水冷效率, 简化仿真模型网格划分与计算难度, 还可以留有足够设计裕量, 保证水冷结构设计的可靠性。

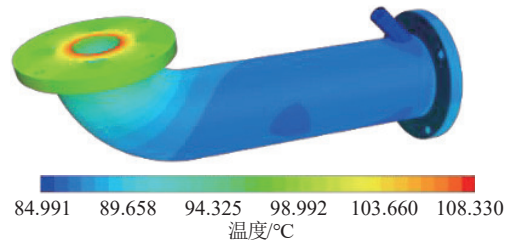
防爆柴油机排气最高温度为排气端口处温度, 因

此在仿真过程选取排气管搭建三维仿真模型, 仿真所选用的课题组已有柴油机为 KC4102 型防爆柴油机。根据防爆柴油机参数 (表 1, 型式: 直列四缸、四冲程、缸内直喷), 确定边界条件为: 排气管内径为 50 mm、总长度约 550 mm, 排气管进口温度 390 °C、冷却水温度 85 °C。选取 K-epsilon Turbulence 模型对排气管进行流-固耦合仿真, 得到如图 4 所示的温度场分布云图。

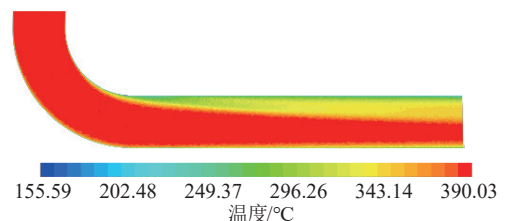
表 1 防爆柴油机基本参数

Table 1 Parameters of explosion-proof diesel engine

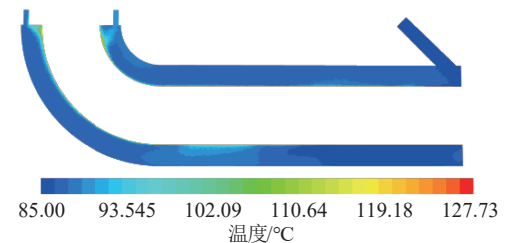
参数	数值	参数	数值
型号	KC4102	额定功率/kW	60
缸径/mm	102	额定转速/(r · min ⁻¹)	2 400
排量/L	3.92	最大扭矩/(N · m)	280
喷油提前角/(°CA)	18	气门摇臂比	1.72
进气阀直径/mm	46	压缩比	17.5
排气阀直径/mm	39	点火顺序	1—3—4—2



(a) 管壁温度场分布云图



(b) 排气温度场分布云图



(c) 冷却水温度场分布云图

图 4 排气管防爆水冷结构温度分布云图

Fig.4 Temperature distribution nephogram of explosion-proof & water-cooled structure of exhaust pipe

由图 4 可知, 排气管管壁最高温度为 108.33 °C, 冷却水温度为 127.73 °C, 而排气管内的气体反应温度仍然能超过 300 °C, 表明防爆水冷结构具有较高的安全裕量, 即能够满足井下防爆要求, 也有效保证了尾

气后处理系统催化反应所需的高温条件。

1.3 四元组合式尾气后处理系统设计

基于“三元”催化处理工艺并考虑井下防爆要求, 设计了如图 5 所示的防爆柴油机尾气后处理系统, 主要由“DOC+DPF+SCR+EPTC”四大部件组成^[19]。为区别于传统“三元”催化式尾气后处理技术, 本文将 EPTC 称为“第四元”, 进而将其命名为防爆柴油机“四元”组合式尾气后处理系统。

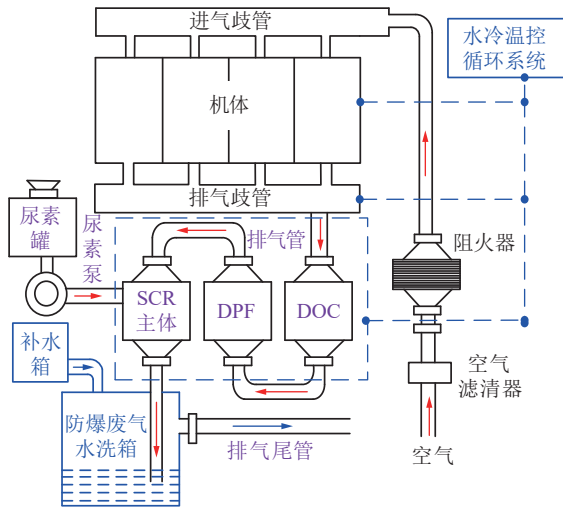


图 5 防爆柴油机四元组合式尾气后处理系统

Fig.5 Four element combined exhaust gas post-treatment system for explosion-proof diesel engines

尾气后处理系统将 DOC 布置于最前端, 在去除 CO 和 HC 的同时, 可将尾气中的 NO 氧化生成 NO₂,

便于后续 SCR 吸收。SCR 布置于 DPF 之后, 能有效防止灰分及颗粒物覆盖在 SCR 催化剂上, 还能使 DPF 有效的连续被动再生, 更加适应井下使用环境, 颗粒物的捕集置于前部也有利于 SCR 工作周期的延长。EPTC 的水冷温控循环系统通过管路分别连接在防爆柴油机、排气歧管以及尾气后处理系统 DOC、DPC 与 SCR 的壳体上, 对系统进行实时水冷温控。EPTC 的防爆废气水洗箱为成熟产品, 将其布置于 SCR 之后, 可对尾气进行直接降温, 使排气出口温度低于 77 °C。

2 尾气后处理系统关键部件参数优化

尾气后处理系统各部件载体体积与柴油机排量有直接关联, 其中 DOC、DPF 与 SCR 的载体体积分别为发动机排量的 0.6~1.2 倍、2.0~2.5 倍、2.0~2.5 倍^[20]。为便于后续试验验证和对比分析, 以图 6 所示的防爆柴电混合动力试验平台中所使用的某型 4 缸 60 kW 自吸防爆柴油机 (表 1) 为研究对象, 利用 GT-Power 发动机开发软件进行 DOC、DPF 与 SCR 部件关键参数的优化设计。

2.1 DOC 关键参数设计及优化

为进一步优化 DOC 尾气净化效率, 利用 GT-Power 软件搭建 DOC 仿真模型, 分析载体长度、直径与通道密度对 DOC 性能影响, 在此基础上利用仿真数据开展正交优化试验, 寻求最优性能数据。

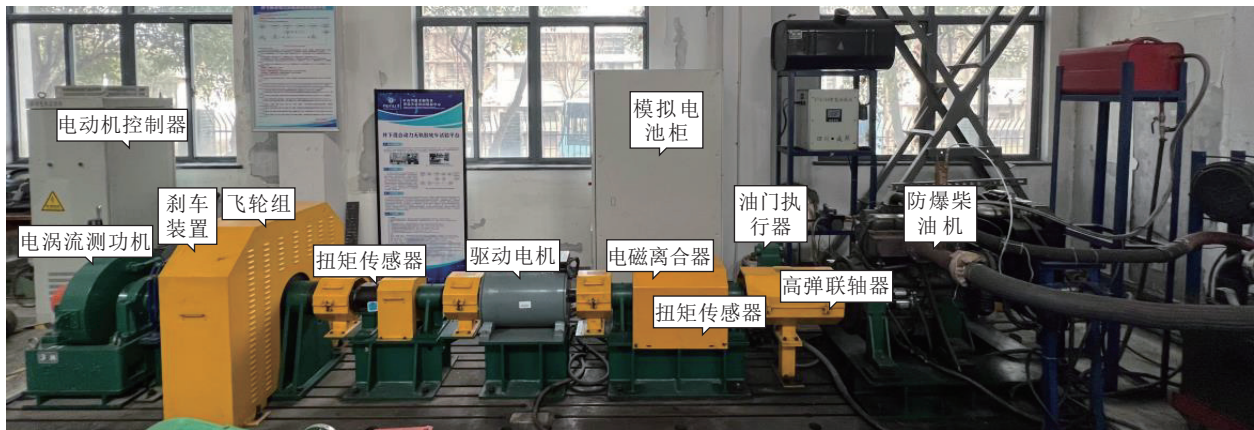


图 6 防爆柴电混合动力试验平台

Fig.6 Test platform for hybrid electric trackless rubber-tyred vehicle

2.1.1 DOC 仿真模型的建立

如图 7 所示, DOC 仿真模型主要由进出口边界、管道模型、载体模块、化学反应模块以及参数分析模块等组成。

2.1.2 关键参数及其对 DOC 性能的影响

蜂窝式堇青石载体有数百目的小孔, 可使催化剂

与尾气污染物充分接触与反应, 为此选择表 2 所示规格的 DOC 蜂窝式堇青石载体作为初始参数, 输入图 7 仿真模型中对载体参数进一步优化。

(1) 载体长度。

在保持载体直径与通道密度不变的情况下, 分别对载体长度为 60~100 mm 的 DOC 部件进行研究, 通

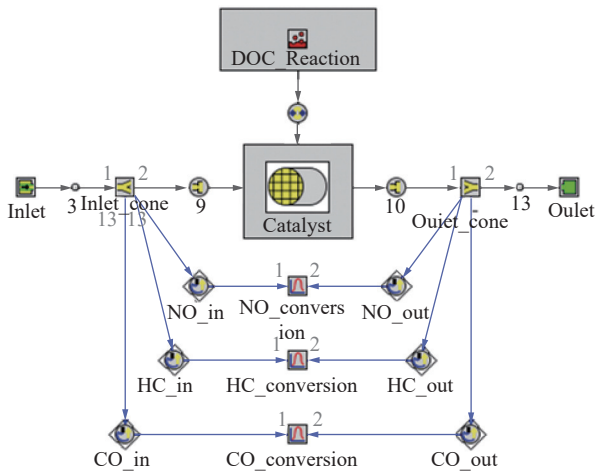


图 7 DOC 仿真模型

Fig.7 DOC simulation model

表 2 DOC 载体规格

Table 2 DOC carrier specification

参数	数值
直径/mm	250
长度/mm	80
体积/L	3.925
通道密度/目	200

过计算得到载体长度对各污染物的净化效率影响如图 8(a) 所示。由图 8(a) 可知, CO 与 HC 的净化效率随载体长度的增加而提高。随着 DOC 载体长度增加, 尾气流经载体的时间延长, 污染物可与催化剂充分接触, 从而导致净化效率提升明显; 当载体长度增大到 90 mm 时, 对 CO 与 HC 净化效率到达峰值约为 93% 与 83%。

(2) 载体直径。

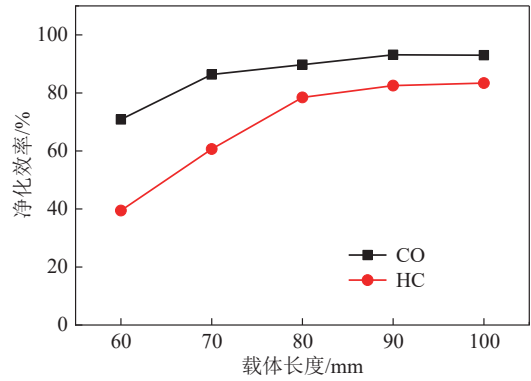
图 8(b) 为 230、240、250、260、270 mm 五个载体直径下的污染物净化效率计算结果。由图 8(b) 可知, 增大载体直径有利于 CO 和 HC 污染物的净化消除。DOC 载体直径在 250、260、270 mm 时性能较为理想, CO 净化效率均在 90% 以上, HC 净化效率均在 75% 以上。

(3) 通道密度。

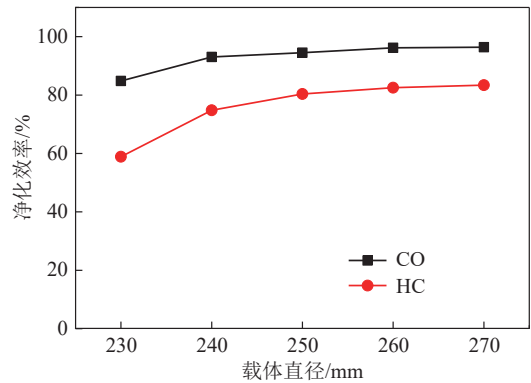
DOC 载体的通道密度是一个关键的结构参数, 通常用每平方英寸的通道数量 (目数) 来表示。通道密度大小意味着反应单元数目的多少, 因此其对污染物的净化效率至关重要。图 8(c) 为通道密度对 CO 和 HC 净化效率的影响。由图 8(c) 可知, 随着通道密度的增大, 污染物与催化剂接触面积增大, CO 和 HC 的净化效率逐渐提高, 在 300 目时, 净化峰值为 96% 与 83%, 这表明通道密度越大对于尾气污染物的接触越多, 还原反应效率越高。

2.1.3 DOC 关键结构参数正交试验优化

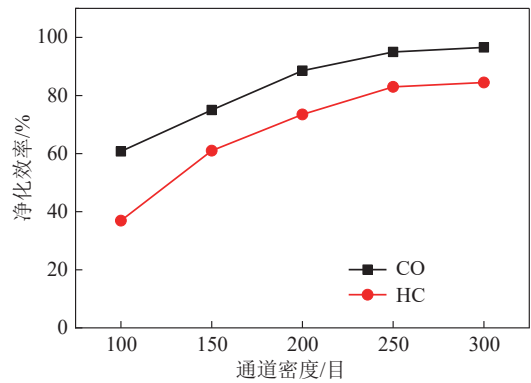
在掌握关键参数对 DOC 性能的影响规律的基础



(a) 载体长度对 CO 和 HC 净化效率的影响



(b) 载体直径对 CO 和 HC 净化效率的影响



(c) 通道密度对 CO 和 HC 净化效率的影响

图 8 关键参数对 DOC 性能的影响

Fig.8 Effect of key parameters on DOC performance

上, 可通过 SPSS 软件进行正交试验找到载体长度、直径与通道密度三因素之间的最佳水平组合, 设计方案见表 3。

从图 9 中可以看出, 9 种设计方案对于 CO 与 HC 的尾气净化效率分别大于 92% 与 74%。其中方案 3(载体长度 100 mm、载体直径 270 mm、通道密度 300 目) 时, 尾气净化效率最高, 分别为 98% 与 88%。

2.2 SCR 关键参数设计及优化

为进一步优化 SCR 尾气净化效率, 利用 GT-Power 软件搭建 SCR 仿真模型, 分析关键参数对 SCR 性能影响, 并通过正交优化试验寻求最优参数。

表 3 DOC 关键结构参数设计方案

Table 3 DOC key structural parameter design scheme

方案	载体长度/mm	载体直径/m	通道密度/目
1	80	250	300
2	90	260	300
3	100	270	300
4	80	270	250
5	90	250	250
6	100	260	250
7	80	260	200
8	90	270	200
9	100	250	200

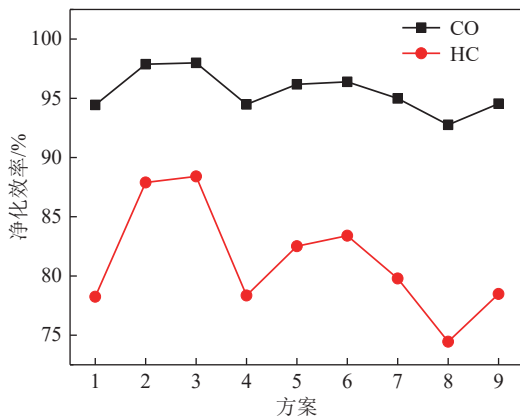


图 9 正交试验方案计算结果

Fig.9 Calculation results of orthogonal test scheme

2.2.1 SCR 仿真模型的建立

图 10 为所搭建的 SCR 仿真模型, 主要包括进出口边界、管道、SCR 反应载体、化学动力学反应模块、尿素喷射模块和参数分析模块等。

2.2.2 关键参数及其对 SCR 性能的影响

SCR 与 DOC 反应原理相似, 因此均采用如表 2 所示的蜂窝式堇青石载体作为初始参数, 输入图 10

仿真模型中开展参数优化试验。

(1) 载体长度。

在保持载体直径与通道密度不变的情况下, 分别对载体长度为 60~130 mm 的 DOC 装置进行研究, 最终结果如图 11(a) 所示。从图 11(a) 可知, NO_x 净化效率随着载体长度的增加而上升。随着载体长度增加, 尾气流经 SCR 载体的时间延长, NO_x 与催化剂充分接触, 净化效率提升明显; 而当 SCR 载体长度超出 100 mm 后, NO_x 的净化效率不随载体长度的增加而明显提高, 最终稳定在 93% 左右; 因 NO₂ 既可单独与 NH₃ 反应, 又可与 NO、NH₃ 共同反应生成 N₂, 不需要 O₂ 参与, 因此尾气净化效率可一直维持在 99%。

(2) 载体直径。

图 11(b) 为 230、240、250、260、270、280、290、300 mm 八个载体直径下的污染物净化效率计算结果。由图 11(b) 可知, 增大载体直径有利于 NO 和 NO₂ 污染物的转化消除: SCR 载体直径在 270、280、290、300 mm 时性能较为理想, NO_x 净化效率均在 90% 以上, NO₂ 的净化效率均在 98% 以上。

(3) 通道密度。

由图 11(c) 可以发现, 在 100~300 目的参数范围内, 随着 SCR 载体通道密度的增大, NO 与 NO_x 净化效率不断升高, 在 250 目时达到净化效率峰值 91%。

2.2.3 SCR 关键结构参数正交试验优化

利用正交试验进行 SCR 的参数优化分析, 可得到最优的结构参数, 设计方案见表 4。

由图 12(a) 可知, 各方案对 NO、NO₂ 与 NO_x 的净化效率均在 90% 以上, 尾气净化效果良好。结合图 12(b) 对 NO 和 NO₂ 最终排放量分析可知, 方案 3 分别为 1.61×10⁻⁶ 与 3.45×10⁻⁶, 排放量最低, 因此, 载体长度 120 mm、载体直径 290 mm、通道密度 300 目

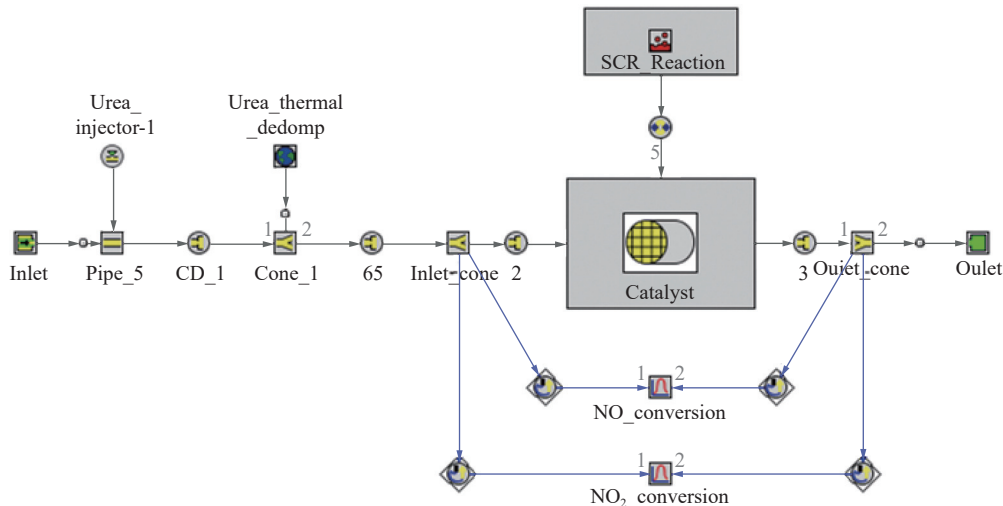
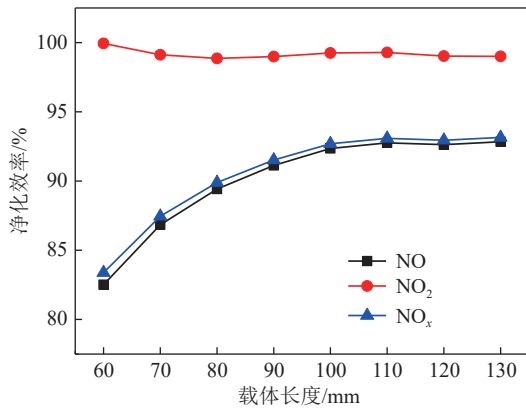
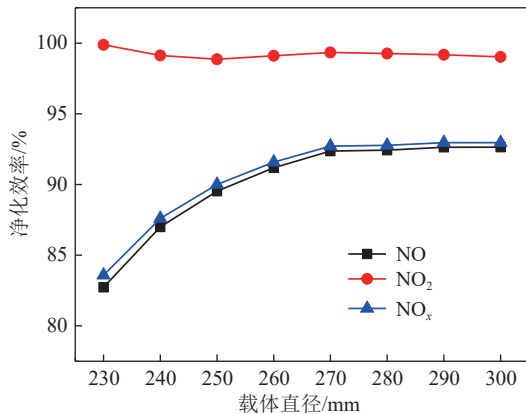


图 10 SCR 仿真模型

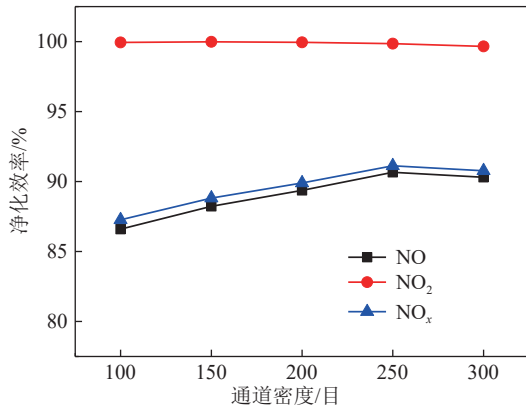
Fig.10 SCR simulation model



(a) 载体长度对NO、NO₂和NO_x净化效率的影响



(b) 载体直径对NO、NO₂和NO_x净化效率的影响



(c) 通道密度对NO、NO₂和NO_x净化效率的影响

图 11 关键参数对 SCR 的影响

Fig.11 Influence of key parameters on SCR

时,对污染物净化效率最高。

2.3 DPF 关键参数设计及优化

为进一步优化 DPF 对颗粒物的物理捕集效果,可利用 GT-Power 软件搭建 DPF 仿真模型开展研究。

2.3.1 DPF 仿真模型的建立

图 13 为建立的 DPF 仿真模型,其由进出口边界、管道模型、Soot 喷射模块、载体模块以及参数分析模块等组成。

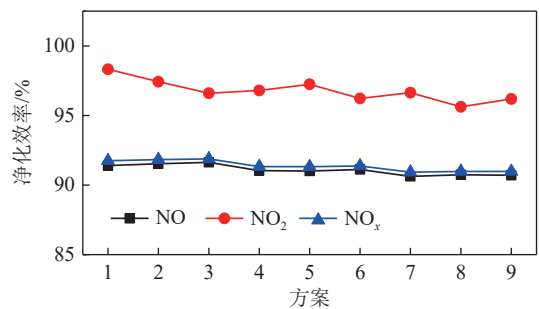
2.3.2 关键参数及其对 DPF 性能的影响

选择堇青石陶瓷作为 DPF 载体,初步设定 DPF 载

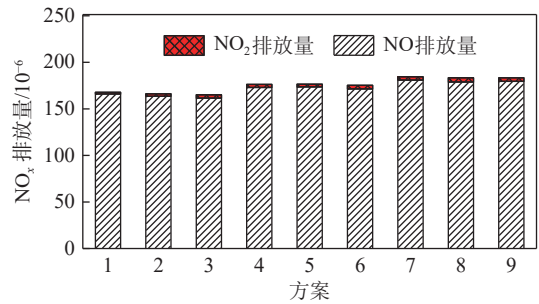
表 4 SCR 关键结构参数设计方案

Table 4 SCR key structural parameter design scheme

方案	载体长度/mm	载体直径/mm	通道密度/目
1	100	270	300
2	110	280	300
3	120	290	300
4	100	290	250
5	110	270	250
6	120	280	250
7	100	280	200
8	110	290	200
9	120	270	200



(a) NO、NO₂和NO_x净化效率



(b) NO和NO₂最终排放量

图 12 正交试验方案计算结果

Fig.12 Calculation results of orthogonal test scheme

体规格见表 5,输入图 13 仿真模型中可开展性能试验。

(1) 载体长度。

载体长度对颗粒捕集效率以及压降的影响如图 14(a) 所示。由图 14(a) 可知,随着载体长度的增大,捕集效率有所上升,而排气压降逐渐减小,在长度 200 mm 时 PM 颗粒物达到 97% 最高捕集效率与最低 6.38 kPa 压降。这是因为载体长度的增大使得过滤体的有效作用面积增大,对于颗粒物的捕集效率更加高效。同时,随着颗粒物的不断累积,过滤体有效作用面积越大,沉积的颗粒层的厚度增加过程越慢,从而使得排气压降有一定程度的减小。

(2) 载体直径。

图 14(b) 为载体直径对 DPF 性能的影响。由图 14(b) 可知,载体直径对 DPF 捕集效率及压降的影响与载体

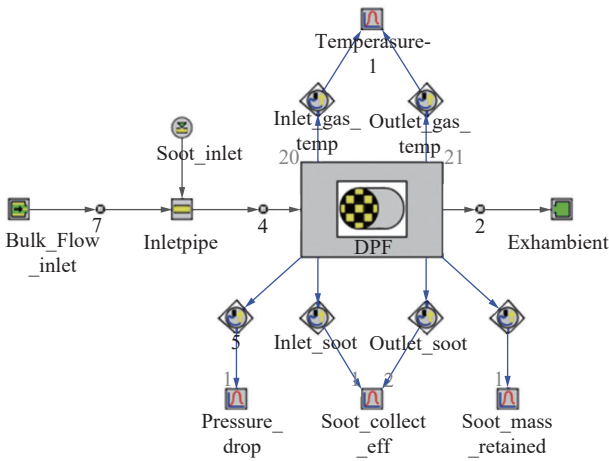


图 13 DPF 仿真模型

Fig.13 DPF simulation model

表 5 DPF 载体规格

Table 5 DPF carrier specification

参数	数值
直径/mm	250
长度/mm	160
体积/L	7.85
通道密度/目	200

长度相似: DPF 捕集效率随着载体直径的增大而升高, 压降随着载体直径的增大而减小, 而出现该现象的原因在于增大载体直径的效果和增大载体长度相同, 均能增大过滤体的有效作用面积。

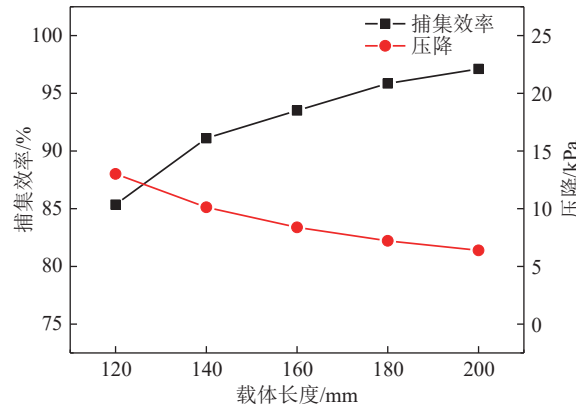
(3) 通道密度。

从图 14(c) 可以看出随着通道密度增加, PM 颗粒物的捕集效率始终维持在 96% 附近, 表明通道密度几乎不影响 DPF 的捕集效率及压降。从结构层分析可知, 因为 DOC 和 SCR 通道是给化学反应提供环境, 因此通道数量会对装置内部的反应过程产生明显影响; DPF 是通过过滤壁对颗粒物进行捕集, 载体长度和载体直径会影响过滤壁的有效作用面积, 而通道密度对于过滤壁的有效作用面积以及捕集过程没有显著影响。

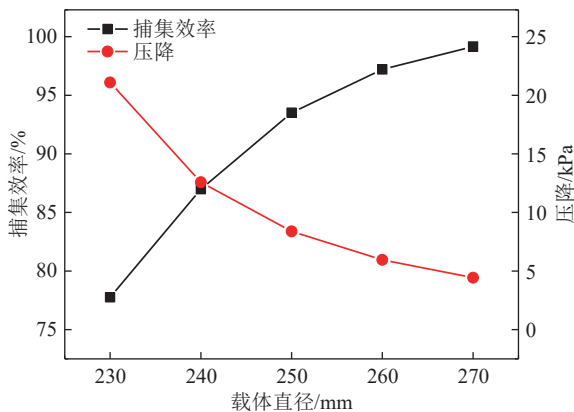
DPF 的正交试验优化过程与 DOC、SCR 一致, 因此不再赘述。最终, 确定得到的尾气后处理系统关键部件最优参数见表 6。

3 尾气后处理系统仿真试验

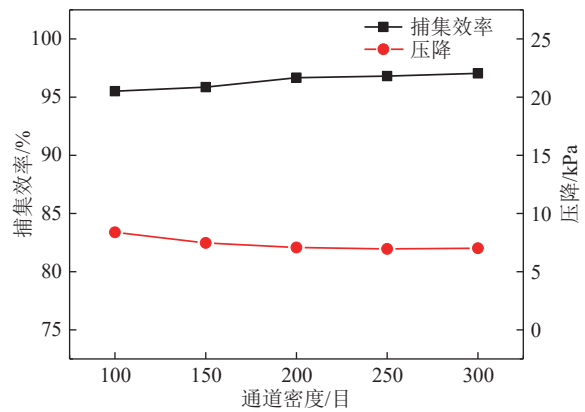
在完成防爆柴油机尾气后处理系统关键部件仿真模型与参数优化的基础上, 为探究尾气后处理系统尾



(a) 载体长度对DPF捕集效率和压降的影响



(b) 载体直径对DPF捕集效率和压降的影响



(c) 通道密度对DPF捕集效率和压降的影响

图 14 关键参数对 DPF 性能的影响

Fig.14 Influence of key parameters on DPF performance

气污染物净化效果与对防爆柴油机的动力性、经济性影响,开展了仿真试验研究与样机台架试验进行验证。

3.1 仿真模型建立

在 GT-Power 软件中可利用表 1 的参数搭建防爆柴油机仿真模型,将其与图 7、图 10 与图 13 所示的尾气后处理系统关键部件仿真模型进行耦合,可得到如图 15 所示的防爆柴油机与尾气后处理系统耦合仿真模型,可以利用该模型进行试验。

3.2 尾气后处理系统排放污染物净化效率

通过耦合仿真模型对排放污染物 NO、CO、HC

表 6 尾气后处理系统关键部件参数优化结果

Table 6 Optimization scheme for parameters of key components of exhaust aftertreatment system

关键参数	DOC	DPF	SCR
直径/mm	270	270	290
长度/mm	100	200	120
体积/L	5.72	11.45	7.92
通道密度/目	300	200	300

与 PM 颗粒物的净化效果进行仿真,得到如图 16 所示

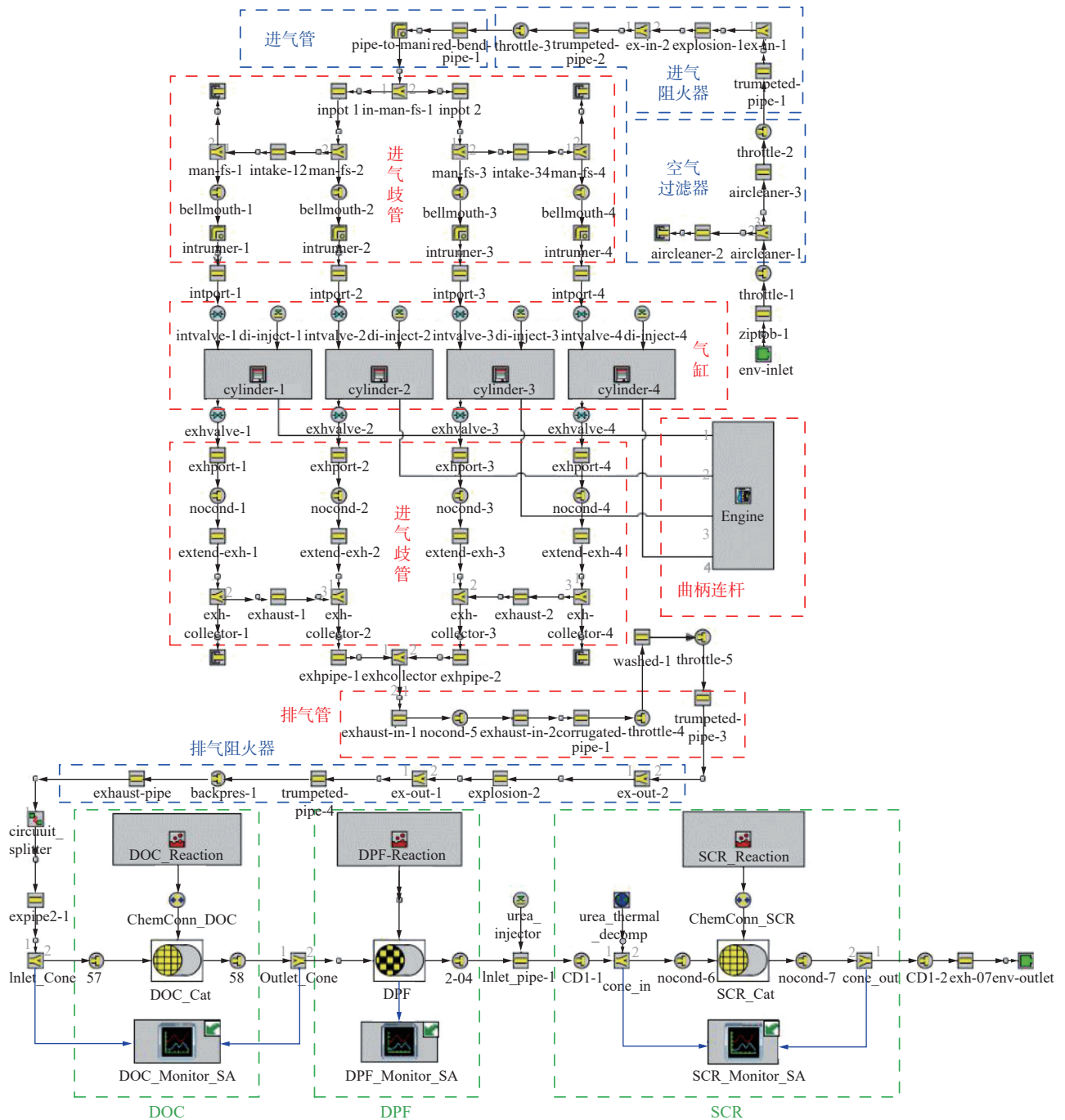


图 15 防爆柴油机与尾气后处理系统耦合仿真模型

Fig.15 Coupling model of explosion-proof diesel engine and exhaust aftertreatment system

示的结果。

由图 16(a) 可知, 原机 NO 排放量随着柴油机转速的升高而逐渐降低; 在加装后处理装置后 NO 排放量显著降低, NO 净化效率在 91% 以上。由图 16(b) 可知, 原机 CO 排放量随着转速的升高而升高; 加装后处理系统后 CO 排放量显著减少, CO 的净化效率在 95% 以上, 表明该系统不仅可保证净化, 还具有设计裕量。

由图 16(c) 可知, 防爆柴油机产生的 HC 体积分数远低于 NO 与 CO 体积分数, 经尾气后处理系统的净化后, HC 排放量均低于 10×10^{-6} , 净化效率均在 83% 以上。由图 16(d) 可知, DPF 对于碳烟颗粒物的捕集效率随着转速的升高而降低。这是因为随着转速的升高, 发动机的输出功率增大, 排气流量增大, 不利于碳烟颗粒物的捕集; 本算例中 DPF 捕集效率均在 97% 以上。

3.3 加装尾气后处理系统对动力性与经济性影响

为探究加装尾气后处理系统对防爆柴油机动力性与经济性是否有影响, 需利用耦合仿真模型进行动

力性与经济性试验, 得到了如图 17 所示的结果。

由图 17(a) 可知, 加装后处理系统前后防爆柴油机的输出功率变化曲线基本保持一致, 但加装后处理系统后, 防爆柴油机输出功率平均值降低 4.97%, 在 1 000 r/min 时功率损失最大, 输出功率较未加装后处理装置前下降 12.46%。从图 17(b) 中可知, 加装后处理系统后, 防爆柴油机扭矩输出有所降低, 在中低转速下输出扭矩的降低幅度较大, 其中, 在 1 000 r/min 时输出扭矩下降最明显, 下降了 12.46%; 整体输出扭矩平均下降为 4.83%。综上可知, 加装后处理系统对柴油机动力性能在平均值上约有 5% 的下降, 但由于低转速多为启停阶段, 功率和扭矩的损失对防爆柴油机动力性的实际影响较小。如图 17(c) 所示, 加装尾气后处理系统不会影响防爆柴油机的燃油消耗率变化曲线, 但防爆柴油机整体燃油消耗率平均仅增加了 1.19%, 对防爆柴油机经济性的影响可忽略不计。

4 尾气后处理系统台架试验

在完成尾气后处理系统耦合模型的仿真试验分

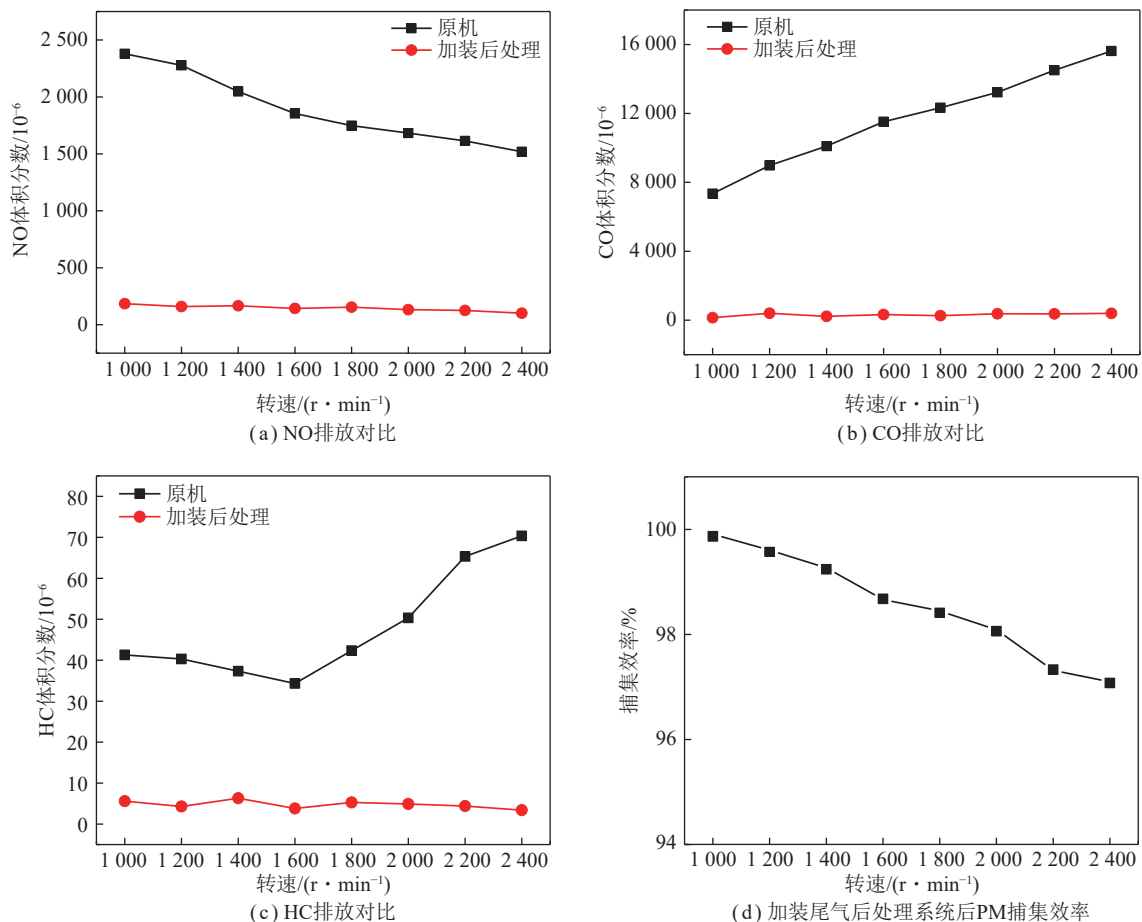


图 16 后处理系统对尾气污染物净化效率

Fig.16 Purification efficiency of aftertreatment system for exhaust pollutants

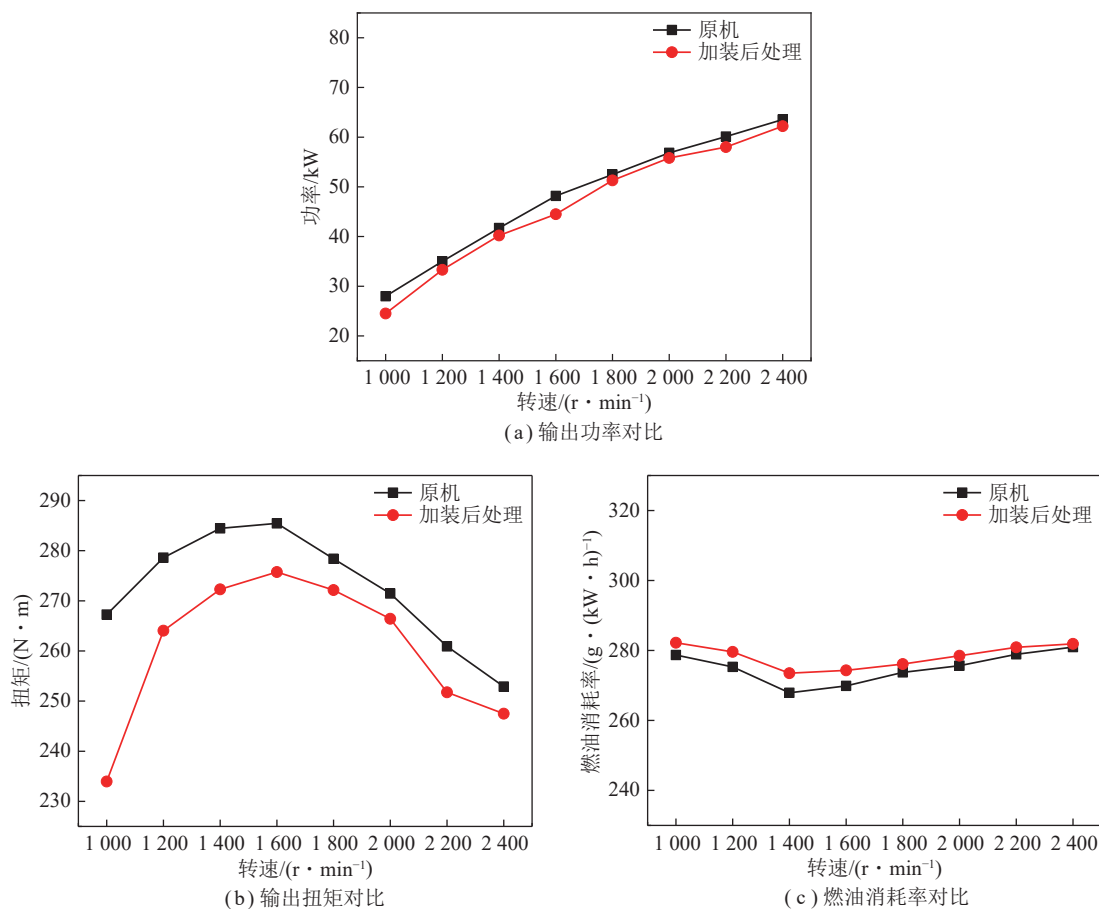


图 17 尾气后处理系统对动力性与经济性的影响

Fig.17 Influence of exhaust aftertreatment system on power and economy performance

析后,通过与相关后处理资质厂商合作,试制了以“DOC+DPF+SCR+EPTC”为核心部件的“四元”组合式尾气后处理系统样机,将其加装在图 6 所示试验平台的某型 60 kW 防爆柴油机上,开展防爆柴油机尾气后处理系统台架试验(图 18)。

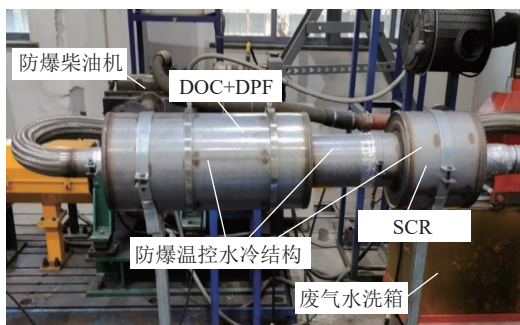


图 18 防爆柴油机尾气后处理系统试验台架

Fig.18 Test platform of explosion proof diesel engine exhaust aftertreatment system

利用如图 18 所示的试验台架开展尾气后处理系统性能试验,并通过对比仿真与试验结果,可验证耦合模型仿真分析的准确性、对优化后的尾气后处理系统性能进行评估和分析。

图 19 是加装尾气后处理系统后的 CO、HC 和 NO 排放量仿真值与试验值对比。由图 19 可知,仿真计算结果与试验值有所差异但均在一个数量级上,总体吻合良好。与未加装尾气后处理系统的防爆柴油机原机相比,试验测得 NO 净化效率在 90% 以上,CO 净化效率在 95% 以上,HC 净化效率在 83% 以上。加装尾气后处理系统的关键污染物排放仿真计算结果与试验值基本一致,证明本研究所提出的四元组合式尾气后处理系统设计方案的可行性与设计参数的合理性。

5 结 论

(1) 超前面向非道路国 IV 排放标准,设计了防爆柴油机“四元”组合式尾气后处理系统,在此基础上试制了尾气后处理系统样机并开展台架试验,结果表明:CO 净化效率在 95% 以上,NO 净化效率在 90% 以上,HC 净化效率在 83% 以上,颗粒物的捕集效率在 97% 以上,可满足非道路国 IV 排放标准要求,为国内外煤矿防爆柴油机井下尾气后处理技术研究与应用提供参考。

(2) 三元催化反应的化学反应空间由载体长度、载体直径和通道密度等参数决定,通过对关键部件参

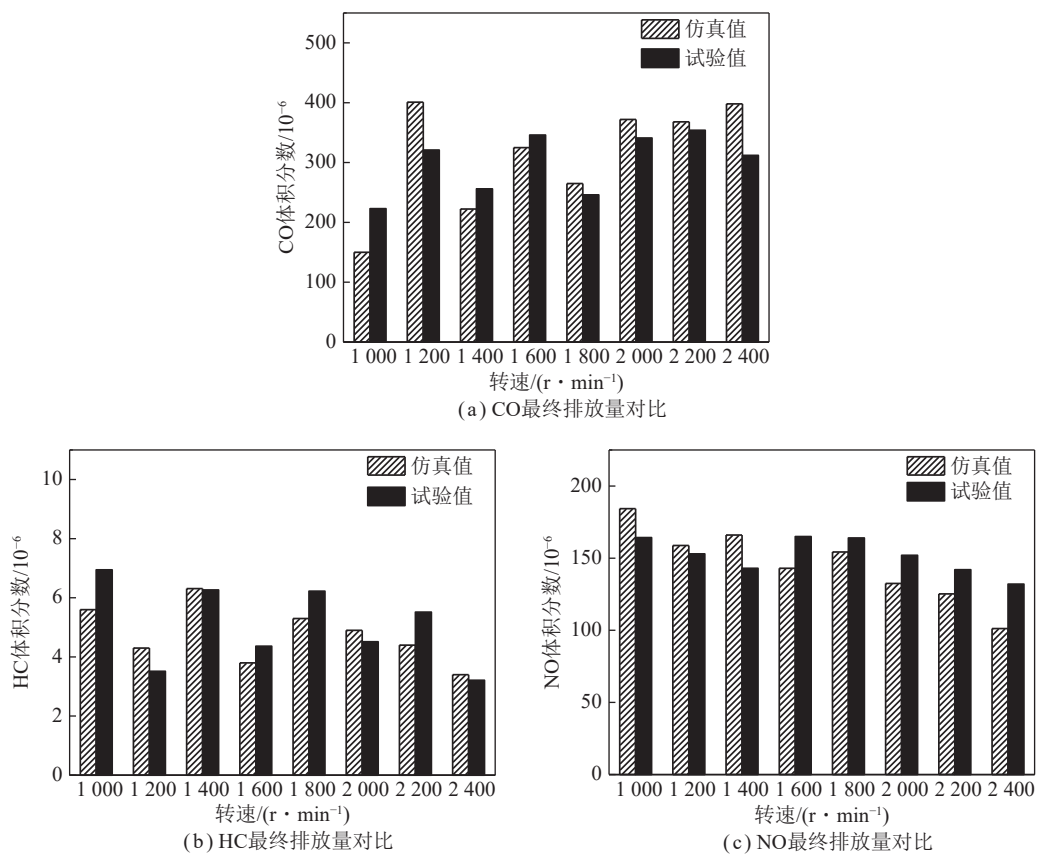


图 19 尾气污染物排放量仿真值与试验值对比

Fig.19 Comparison between simulation value and test value of exhaust pollutant emissions

数进行尾气污染物净化性能仿真,可得到如下规律:污染物的净化效率随 DOC 和 SCR 的载体直径、载体长度的增大而提高,但当超出三元催化反应所需的反应空间后,污染物的净化效率不再提升;载体长度和载体直径对 DPF 的捕集效率规律与 DOC 和 SCR 相同,但因 DPF 是通过过滤壁对颗粒物进行物理捕集,因此通道密度对 DPF 捕集效率几乎无影响。

(3) 通过 GT-Power 仿真软件搭建防爆柴油机与尾气后处理系统耦合仿真模型,结果表明:加装尾气后处理系统会造成防爆柴油机动力性能降低 4.83%,经济性能降低 1.19%,在后续研究中可通过开展尾气后处理系统控制策略研究来降低损失。

参考文献(References):

- [1] 葛世荣, 鲍久圣, 曹国华. 采矿运输技术与装备 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2015.
- [2] 辛海升, 岳海军. 汽车发动机原理与汽车理论 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 非道路柴油移动机械污染物排放控制技术要: HJ 1014—2020 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [4] 袁晓明. 煤矿无轨辅助运输工艺和发展方向研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(5): 1-5.
- [5] YUAN Xiaoming. Analysis of coal mine trackless auxiliary transportation technology and the development direction[J]. Coal Engineering, 2019, 51(5): 1-5.
- [6] 高吉, 王铁, 张瑞亮, 等. 阻火器型式对防爆柴油机性能影响的对比分析[J]. 内燃机工程, 2018, 39(3): 66-71.
- [7] GAO Ji, WANG Tie, ZHANG Ruiliang, et al. Comparative study on effect of type of flame arrester on explosion-proof diesel engine performance[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2018, 39(3): 66-71.
- [8] 万川, 邹笔锋, 吴星, 等. 重型柴油机尾气后处理技术研究现状及趋势[J]. 内燃机与配件, 2020(24): 67-72.
- [9] WAN Chuan, ZOU Bifeng, WU Xing, et al. Research status and development of exhaust after-treatment technology for heavy-duty diesel engines[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(24): 67-72.
- [10] HAN J, KIM T, JUNG H, et al. Improvement of NO_x reduction rate of urea SCR system applied for a non-road diesel engine[J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20(6): 1153-1160.
- [11] TAGLIALATELA F, LAVORGNA M, DI IORIO S, et al. Real time prediction of particle sizing at the exhaust of a diesel engine by using a neural network model[J]. SAE International Journal of Engines, 2017, 10(4): 2202-2208.
- [12] WANG T J, KIM J H. Simulation study on thermal management strategy to achieve 99% SCR efficiency of a heavy-duty diesel engine over a transient cycle[J]. International Journal of Automotive

- Technology, 2018, 19(4): 597-603.
- [10] 范江鹏. 基于防爆电控柴油机的尾气排放研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(12): 269-271.
FAN Jiangpeng. Research on exhaust emission based on flameproof electric control diesel engine[J]. Coal Technology, 2018, 37(12): 269-271.
- [11] 王晓, 杨建勇, 陈利东, 等. 一种矿用智能可控废气循环装置及控制方法: CN112392630B [P]. 2021-11-23.
- [12] 陈东东, 张翠平, 张瑞亮, 等. DOC/CDPF 对防爆柴油机性能的影响[J]. 机械设计与制造, 2020(6): 109-112.
CHEN Dongdong, ZHANG Cuiping, ZHANG Ruiliang, et al. The influences of DOC/CDPF on the performance of explosion-proof diesel engine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(6): 109-112.
- [13] 彭振. 矿用防爆柴油机尾气后处理技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
PENG Zhen. Study on exhaust aftertreatment technology of mining flameproof diesel engine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [14] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- [15] 臧志成, 朱磊, 陈凌云, 等. DPF 喷油助燃主被动再生系统电控单元开发[J]. 内燃机工程, 2016, 37(5): 74-79.
ZANG Zhicheng, ZHU Lei, CHEN Lingyun, et al. The electronic control unit development of fuel injection combustion active and passive DPF regeneration system[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(5): 74-79.
- [16] 李顺利. DOC+DPF 系统对柴油机 PM 及气态排放物的影响研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
LI Shunli. Study on the influence of DOC+DPF system on PM and gaseous emissions of diesel engine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [17] 魏肖, 鲍久圣, 谭飞, 等. 矿用防爆柴油机瞬态工况特性及其参数优化[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 138-146.
WEI Xiao, BAO Jiusheng, TAN Fei, et al. Transient condition characteristics and parameter optimization of mine explosion-proof diesel engine[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(2): 138-146.
- [18] 谭飞, 鲍久圣, 葛世荣, 等. 矿用防爆柴油机关键技术研究现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 176-182.
TAN Fei, BAO Jiusheng, GE Shirong, et al. Research status and prospect of key technologies for mine explosion-proof diesel engines[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 176-182.
- [19] 鲍久圣, 彭振, 袁晓明, 等. 矿用防爆柴油机尾气净化装置: CN213270019U [P]. 2021-05-25.
- [20] 姜山, 高祥, 吴旭陵, 等. 一款柴油机匹配后处理系统的试验分析[J]. 汽车与新动力, 2019, 2(3): 80-83.
JIANG Shan, GAO Xiang, WU Xuling, et al. Experimental analysis of a diesel engine matching aftertreatment system[J]. Automobile and New Powertrain, 2019, 2(3): 80-83.