DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202501009

基于船舶排气工况下 DOC + SCR 后处理系统催化作用

孙　豫[1]，钱叶剑[1]，龚　震[1]，孙　泽[2]
（1. 合肥工业大学汽车与交通工程学院，合肥 230009；2. 安徽江淮汽车集团股份有限公司，合肥 230022）

摘要：为研究船舶中速柴油机应用柴油氧化催化器（DOC）技术的可行性，试验了船舶柴油机典型低温大流量工况下 DOC 对选择性催化还原器（SCR）催化性能及共同作用下颗粒物（PM）理化性质的影响. 结果表明：在典型的低温大流量工况下 DOC 的应用会提升 SCR 系统的催化效率，在柴油机高负荷排气工况（空速为 18 000 h^{-1}）下催化效率提升了 65%；DOC 和 SCR 共同作用会降低 PM 的石墨化程度，且排气温度越高，石墨化程度越低；共同作用会增加 PM 表面含氧官能团的浓度，其中 C—OH 官能团含量增加了 100%，PM 的氧化活性大幅提升；在碳氢官能团中，作为 PM 生长核心的脂肪族 C—H 官能团浓度大幅降低，降低幅度达到了 50%，减少了 PM 的继续生长和聚集的机率.

关键词：船舶柴油机；碳烟颗粒；石墨化程度；表面官能团；后处理系统
中图分类号：TK407.9　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909（2025）01-0072-07

Investigation of catalytic effect in DOC + SCR system under marine exhaust conditions

Sun Yu[1]，Qian Yejian[1]，Gong Zhen[1]，Sun Ze[2]
（1. School of Automotive and Transportation Engineering，Hefei University of Technology，Hefei 230009，China；
2. Anhui Jianghuai Automobile Group Company Limited，Hefei 230022，China）

Abstract：To investigate the feasibility of utilizing diesel oxidation catalytic converter（DOC） technology in marine medium speed diesel engines，an experimental study was conducted to examine the effects of DOC on selective catalytic reduction（SCR） performance and physicochemical properties of particulate matter（PM） under typical low temperature and high flow conditions in marine diesel engines. The experimental results demonstrate that the utilization of DOC can enhance the catalytic efficiency of the SCR system in typical low temperature and high flow conditions，resulting in a 65% increase in catalytic efficiency under high load（18 000 h^{-1}） exhaust condition of the diesel engine. The addition of DOC can decrease the degree of graphitization in PM，and this effect is more pronounced at higher exhaust temperatures. The application of DOC can also enhance the concentration of oxygen-containing functional groups on the surface of PM，particularly leading to a 100% increase in the concentration of C—OH functional group. Consequently，this significantly enhances the oxidation activity of PM. In hydrogen-containing functional groups，the concentration of aliphatic C—H functional group，which serves as the growth nucleus of PM，is significantly reduced by 50%，thereby impeding the continued growth and aggregation of PM.

Keywords：marine diesel engines；particulate matter；graphitization；surface functional groups；aftertreatment

当前船舶柴油机的排放法规已提升至 Tier Ⅲ阶段，减少有害排放和提高燃油经济性成为船舶柴油机面临的主要问题. 碳烟颗粒物（PM）是柴油机尾气中最主要的污染物[1]. 对于缸径更大、转速更低的船用柴油机，单独的机内净化方法[2-3]很难满足严苛的排放法规，需要结合相应的后处理控制措施.

船舶柴油机控制 PM 排放的后处理措施主要是湿式洗涤法[4]，但该方法会产生大量的污水，对氮氧

收稿日期：2024-02-09；**修回日期**：2024-06-19.
基金项目：安徽省科技重大专项资助项目（202003a05020023）.
作者简介：孙　豫，博士研究生，sy_hfut_2021@163.com.
通信作者：钱叶剑，博士，教授，qianyjian@163.com.

化物(NO_x)的催化转化也没有促进作用，限制了其进一步发展. 船舶柴油机排气流量大、排气温度相对较低(<280 ℃)，若采用颗粒捕集器(DPF)控制 PM 排放会导致排气背压升高，影响柴油机工作性能[5-6]. 作为氧化型催化器，柴油机氧化催化器(DOC)的催化活性窗口温度宽，能促进 PM 的氧化反应，适用于低温大排量的排气工况[7]. Liang 等[8]在一台排量为 199 L 的船舶柴油机上研究了 DOC 对碳烟颗粒的影响，发现 PM 的氧化活性随着 DOC 轴向流动而线性增加，DOC 的高效氧化反应能有效控制 PM 排放. García 等[9]也指出 DOC 能有效降低瞬态工况下柴油机的 PM 和一氧化碳(CO)排放. 因此，DOC 装置具备降低船舶柴油机 PM 排放的潜力[8,10].

研究发现，在后处理系统中 DOC 还具有一定的耦合促进作用. Boutikos 等[11]发现 DOC 提升了 NO_x 和 PM 氧化活性，增强了下游的催化反应. Hu 等[12]提出“热延迟效应”概念来表征 DOC 对系统催化效率的提升. Leskovjan 等[13]研究了重型柴油机不同的 DOC 和选择性催化还原(SCR)组合，发现 DOC 能促进不同 SCR 系统的催化性能. 此外，DOC 还能影响 PM 表面官能团. 由于表面官能团首先参与 PM 的氧化反应，其浓度会显著影响 PM 氧化活性. Liati 等[14]发现 PM 流经 DOC 后其微观层面衍生出易氧化的特征结构，但 DOC 对 PM 表面官能团的影响机制还不明确.

综上所述，DOC 不仅能降低 PM 排放，还能提升 SCR 催化效率和 PM 的氧化活性. 不过，上述研究结论多来源于车用柴油机的研究，典型船舶柴油机工况下 DOC 对 SCR 催化性能及颗粒物理化特性的影响机理尚未厘清. 笔者开展了船舶中速柴油机排气工况下不同后处理组合方式(SCR 和 DOC + SCR)的台架试验，利用拉曼光谱仪(RS)、X 射线光电子能谱仪(XPS)和傅里叶红外光谱仪(FTIR)分析表征 DOC 对 PM 的石墨化程度、氧化活性和表面官能团浓度等变化规律，相关研究可为船舶中速柴油机排放控制提供有意义的参考.

1　试验系统与分析方法

1.1　台架试验系统

船舶柴油机的排量大、工作转速与工况稳定，排气具有温度低、流量大的特点. 鉴于大型船舶柴油机试验的经济成本与时间成本高昂[2,15]，笔者等开发了一套柴油机后处理评价系统，如图 1 所示. 该系统以一台 3.0 L 排量、直列 4 缸高压共轨柴油机作为尾气来源，相关参数见表 1. 通过温度和流量控制模块，解耦尾气状态参数(温度、流量和压力)与发动机负荷之间的联系，模拟船舶柴油机低温、大流量排气工况.

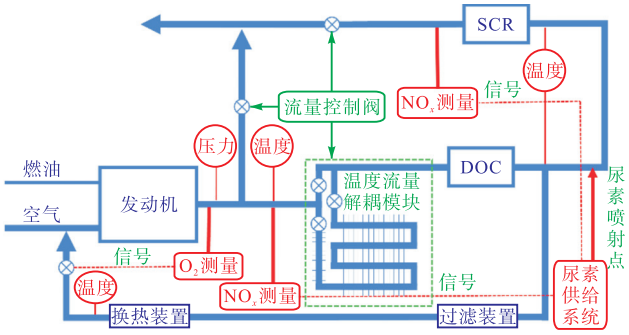


图 1　柴油机后处理评价系统示意

Fig.1　Diesel engine aftertreatment evaluation system

表 1　发动机相关参数

Tab.1　Engine specifications

参数	数值
型式	直列
缸径/mm	230
压缩比	14.3
循环	4
气缸数	6
活塞行程/mm	320
标定功率/kW	1 300
标定转速/(r · min^{-1})	900

选取型号为 DE-23 的 6 缸船舶中速柴油机为研究对象，依据船用 D2 试验循环的排气测试数据如表 2 所示，将试验尾气调整为：碳氢化合物(THC)体积分数为 160×10^{-6}，氮氧化物(NO_x)体积分数为 500×10^{-6}，CO_2 体积分数为 5%，CO 体积分数为 100×10^{-6}，O_2 体积分数为 15%.

表 2　船舶柴油机尾气组分参数

Tab.2　Exhaust components of marine diesel engine

负荷/%	体积分数			
	$NO_x/10^{-6}$	$CO/10^{-6}$	$THC/10^{-6}$	CO_2/%
10	330	115	174	3.4
25	430	76	160	4.5
50	505	75	175	5.4
75	535	88	145	6.1
100	550	85	138	7.1

后处理系统中 DOC 的贵金属 Pt 与 Pd 物质的量比为 3，采用了均匀涂覆技术；SCR 为 Cu-SSZ-13 分子筛型催化剂，具体参数见表 3. 试验时，采用等效空速的方式控制流经后处理催化装置的废气流量，使用 HORIBA 公司的 CVS-ONE-MV-HE 定容采样系统采集 PM；采集 PM 时稀释尾气的温度不超过 52 ℃，通过聚四氟乙烯滤纸进行采集，抑制 PM 的团聚和氧化，确保试验的准确性.

表 3 催化剂参数

Tab.3 Parameters of catalyst

参数	SCR	DOC
体积/L	5.79	2.00
孔密度/(个·cm^{-2})	0.62	0.62
载体	堇青石	堇青石
负载量/(g·L^{-1})	200	25
金属物质的量配比	Cu	3(Pt∶Pd)

参考船舶柴油机的排气工况和催化剂特性，试验工况如表 4 所示. 其中，测量工况为 SCR/DOC + SCR-排气温度-空速，采集工况为 SCR/DOC + SCR-PM-排气温度. 为了使试验结果能准确反映出船舶柴油机尾气处理特点，试验工况拓宽了排气温度和空速范围. 其中用于石墨化分析碳烟样品工况选取了 150、180、250 和 300 ℃；用于表面官能团分析的样品工况选择了 250 ℃和 11 000 h^{-1}；排气温度采集点位于发动机排气管出口，该位置也是后处理装置入口处；PM 采集位置位于后处理装置出口处.

表 4 催化性能试验工况参数

Tab.4 Conditions of catalytic performance test

排气温度/℃	空速/h^{-1}	后处理
150 180 220 250 300 350 450	5 000，7 000，11 000， 15 000，18 000	SCR， DOC + SCR

在试验台架的测量系统中使用了 HORIBA 公司的 MEXA-ONE-RS 系统测量尾气排放，利用 AVL 公司的 SESAM160FT 傅里叶变化红外光谱仪实时监测氨逃逸量；相关测量精度如表 5 所示. 其中，CO 和 CO_2 采用了非分散红外(NDIR)技术，THC 采用了火焰离子化检测(FID)技术，NO_x 采用了热化学发光检测(Heated-CLD)技术.

表 5 测量精度

Tab.5 Measurement accuracy of exhaust component

组分体积分数	量程	精度/%
CO/10^{-6}	5 ~ 5 000	± 1.0(FS)
CO_2/%	0.1 ~ 6.0	± 1.0(FS)
THC/10^{-6}	10 ~ 20 000	± 1.0(FS)
NO_x/10^{-6}	10 ~ 10 000	± 1.0(FS)

1.2 表征分析方法

为了提高后处理系统催化效率，明确后处理系统催化剂的优化方向，拟研究 DOC 对 PM 理化性质的影响. PM 的氧化活性影响了后处理系统的能力需求，氧化特性受表面官能团类型和石墨化程度的影响.

拉曼光谱分析法可以检测石墨烯晶格的尺寸和缺陷，是表征 PM 石墨化程度的重要方式. 表征试验使用 HORIBA 公司的 LabRam HR Evolution 型拉曼光谱仪，激光波长为 532 nm，功率设定为 5 ~ 6 mW，光斑直径为 1.2 μm，目镜放大 10 倍，物镜放大 50 倍. 为保证样品均匀度及拉曼分析的可重复性，碳烟样品选取 3 处区域进行扫描，扫描时间为 20 s. 样品均匀度如图 2 所示，3 次测量结果的峰值相位与峰值强度误差较小，表明制备样品均匀度满足试验要求. 其中，1 360 cm^{-1} 处的 D1 峰为无序特征峰，1 600 cm^{-1} 处的 G 峰为有序化碳层特征峰. 结果图谱可采用四峰拟合的方法进行分析，并根据 D1 峰与 G 峰面积比和 D1 峰的半峰宽来衡量 PM 的石墨化程度.

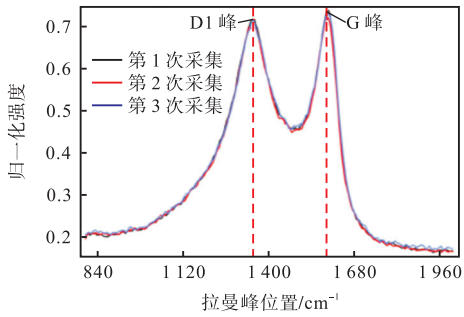


图 2 样品颗粒均匀度验证

Fig.2 Verification of uniformity in particle distribution of sample

PM 表面含有丰富的芳香族 C—H、C=C 和 C—O 等官能团. 在 PM 氧化过程中，官能团可为氧化反应提供更多的反应位点；官能团的种类和特性也影响了 PM 的氧化特性. PM 表面主要官能团分为含氧和碳氢官能团，利用对 C—H 健更为敏感的傅里叶红外光谱(FTIR)仪来表征碳氢官能团，使用 X 射线光电子能谱仪(XPS)表征含氧官能团. FTIR 分析采用了美国 Thermo Nicolet 公司的 Nicolet 型傅里叶变换红外光谱仪，分辨率设置为 4 cm^{-1}，扫描范围为 400 ~ 4 000 cm^{-1}. 为了保证试验结果的可重复性，对样品的均匀度和采样方法均进行了 3 次独立对比. XPS 表征采用美国 Thermo Nicolet 公司的 ESCALAB250Xi 型 X 射线光电子能谱仪，全谱扫描步长设置为 1 eV，通能为 80 eV；精细谱扫描步长设置为 0.1 eV，通能为 40 eV.

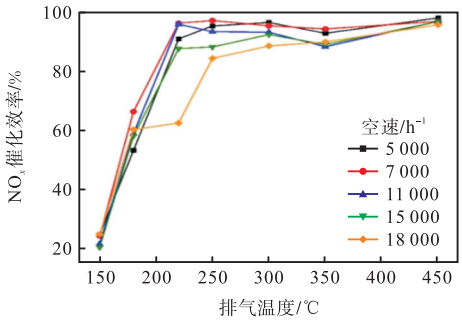
2 试验结果分析

2.1 船舶排气工况下 DOC 装置对催化效率的影响

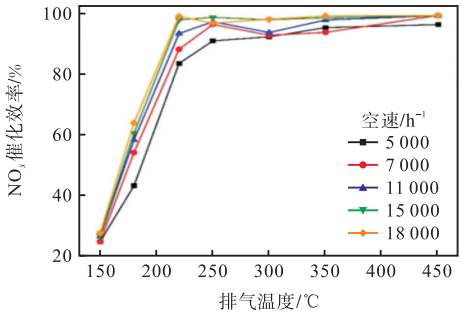
针对船用柴油机排气的低温大流量特点，基于等效空速的方式开展了台架试验，测量了不同后处理系

统布置方式(SCR/DOC + SCR)下催化性能的变化规律. 图 3(a)显示了不同空速下 SCR 系统的 NO_x 催化效率随发动机排气出口温度的变化规律. 在不同空速工况下,随着排气温度的增大,NO_x 的催化效率增加. 当排气温度高于 250 ℃时,催化效率保持在 90% 左右;排气温度处于 150 ~ 250 ℃时,催化效率与排气温度的变化呈线性关系,催化效率从 20% 提升至了 90%. 此外,随着排气空速由 5 000 h^{-1} 提升至 18 000 h^{-1},催化效率总体上呈下降趋势. 其中,在排气温度为 220 ℃时,空速为 7 000 h^{-1} 下催化效率要比 18 000 h^{-1} 下催化效率高了 30%. 造成此现象的原因是空速增大意味着单位时间内通过催化剂的气体量增加,若催化剂上反应位点浓度不变,参与反应的 NO_x 量不变,催化效率降低. 若排气温度增加,NO_x 催化还原反应速率加快,单位时间内参与反应的 NO_x 量增加,导致不同空速下催化效率的差异变小.

保持相同的试验工况,图 3(b)显示了不同空速下 DOC + SCR 对 NO_x 催化效率随发动机排气出口温度的变化规律. 随着排气温度的增加,不同空速下 NO_x 催化效率都呈现出上升趋势. 当排气温度超过 250 ℃后,催化效率稳定在 90% ~ 100%. 在 DOC + SCR 布置方式下,随着空速的增加,催化效率也在提升,这与图 3(a)中催化效率随空速的变化规律是相反的. 原因可能是后处理系统中 DOC 会影响 NO_x 组分中物质的量 $n(NO)/n(NO_2)$ 的值,进而影响 SCR 对 NO_x 催化还原反应过程. 当快速 SCR 反应占比增加后,提高了 NO_x 还原反应速率,空速的增加可能加快了反应产物脱离催化反应位点,使得反应平衡正向移动,因而 NO_x 催化效率随空速的提升而增加. 随着排气温度的增加,不同空速工况下催化效率的差异也保持了减小的趋势,说明排气温度的升高对 NO_x 催化还原反应的促进作用弥补了空速变化带来的差异性. 试验结果表明,在船舶排气工况下 DOC 的应用对 NO_x 的催化还原有促进作用.



(a) SCR



(b) DOC+SCR

图 3　氮氧化物在 SCR 和 DOC + SCR 中的催化效率

Fig.3　Catalytic efficiency of NO_x in SCR and DOC + SCR

船舶柴油机的排气温度相对较低,CO 和 HC 也是主要排放污染物. 图 4 展示了在较低发动机排气出口温度(150 ℃和 180 ℃)工况下后处理系统有/无 DOC 条件下 CO 催化效率随空速的变化规律. 若后处理系统没有 DOC,CO 催化效率维持在 15% ~ 20%,当排气温度提升至 180 ℃后,CO 催化效率增加至 88% ~ 92%. 当采用 DOC + SCR 后处理系统、排温为 150 ℃和 180 ℃下,CO 的催化效率基本保持在 100%. 这说明在船舶排气工况下,DOC 能改善低温排气净化性能. 此外,随着排气空速的提升,CO 催化效率的变化幅度在 3% 以内,说明空速变化对 CO 的催化效率影响较小.

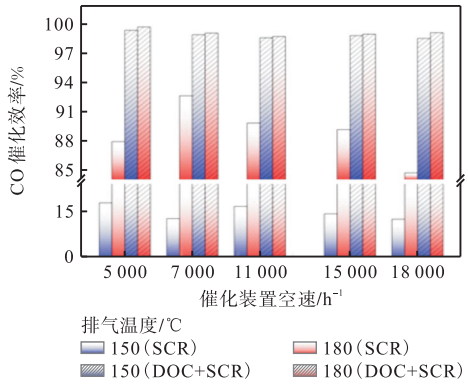


图 4　一氧化碳在后处理装置中的催化效率

Fig.4　Catalytic efficiency of CO in aftertreatment device

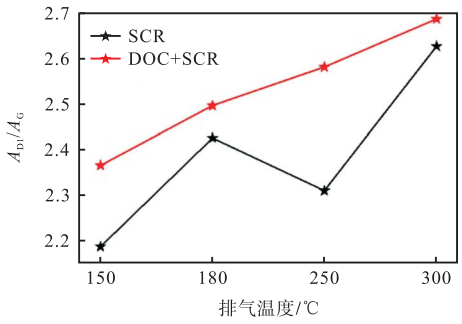
2.2　催化装置对 PM 石墨化程度的影响

PM 是由碳烟微晶片层堆积形成的复杂颗粒,根据堆叠方式可以分为无定型碳和有序石墨晶体. PM 的石墨化程度一定程度上表征了 PM 的氧化能力. 由于燃烧温度对碳烟石墨化程度的影响较大,试验时按照排气温度分类采集碳烟. 为了便于比较分析,拉曼光谱图分析时利用分峰面积与总拟合面积的对比结果进行了归一化处理.

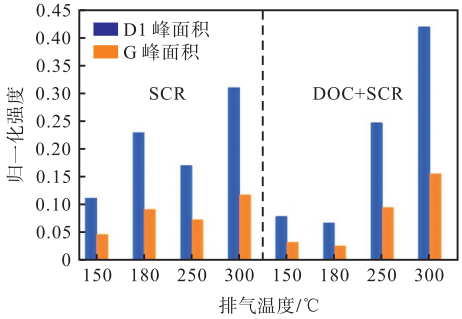
图 5 展示了后处理系统(SCR 和 DOC + SCR)试验条件下 PM 的拉曼光谱分析测试结果. 由图 5(b)可

知，位于 1 360 cm^{-1} 处的 D1 峰是由晶体的对称性转变而产生，通常称为无序峰；G 峰则是由声子振动模产生，并且该峰对碳原子的网格形式很敏感，通常可用来表征微粒中有序化碳层结构. D1 峰和 G 峰的面积比值（A_{D1}/A_G）表示了无序化参数比上有序化参数，可以表征材料的石墨化程度. 由图 5(a) 可以看出，DOC + SCR 工况中 A_{D1}/A_G 的值始终高于 SCR 工况，表明 DOC + SCR 工况下碳烟石墨化程度要低于 SCR 工况. 这说明在相同工况下 DOC 的应用会降低 PM 的石墨化程度，原因可能是 PM 在 DOC 中发生了氧化反应. 柴油机尾气中的氧气含量一般在 13% ~ 15%，对于 PM 的氧化反应可能是富氧环境，所以氧化作用是大于碳化作用，经 DOC + SCR 处理 PM 的石墨化程度更低. 此外，在流经 DOC 后 PM 的表面官能团特征参数发生了明显变化，说明 DOC 对 PM 的化学特性产生的影响较大.

由图 5 可知，随着排气温度的升高，A_{D1}/A_G 值增加了 20% 左右. 不同工况下 D1 峰的半峰宽（FWHM）的对比如图 6 所示；半峰宽表示峰值高度的一半，用于衡量信号或光谱的分辨率、精确性和带宽等特征. 应用 DOC 后，PM 的 D1 峰的 FWHM 值始终较大. 当排气温度大于 150 ℃时，随着排气温度的提升，两个工况下的 D1 峰的 FWHM 值均增加. 这说明组成颗粒的碳晶体内部的六方对称性在丢失或者失去了对称性，颗粒中晶体的无序程度在增加，原因可能是 PM 趋于石墨化的外层占比降低；或者颗粒内部氧化造成结构破碎，间接造成 PM 无序程度加大. 所以随着排气温度的提升，DOC 会减小 PM 的石墨化程度. 另外，在 SCR 工况下 PM 的 D1 峰的 FWHM 值没有表现出随排气温度的规律性变化趋势，说明 SCR 对 PM 石墨化程度的影响较小.



（a）面积比



（b）归一化强度

图 5　PM 的拉曼光谱分析结果

Fig.5　Analysis results of PM Raman test

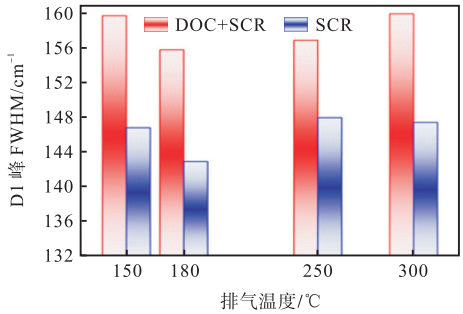


图 6　D1 峰半峰宽在不同排气温度下的变化趋势

Fig.6　Variation trend of the D1-FWHM in different exhaust temperature

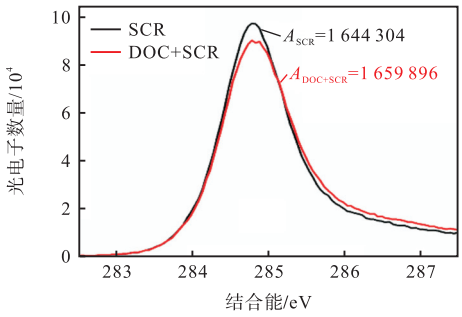
2.3　催化装置对 PM 表面官能团的影响

PM 表面存在大量不同类型的官能团，官能团的存在影响了 PM 的氧化特性. 主要对含氧官能团（C—O）和碳氢官能团（C—H）进行表征测试，对比分析 DOC 装置的添加对 PM 表面官能团的影响. 在采集工况中排气温度为 250 ℃、空速为 11 000 h^{-1}，样品收集自 SCR 和 DOC + SCR 两套后处理装置出口. 图中部分数据结果通过特征峰面积和总拟合面积的比来获得归一化的数据结果.

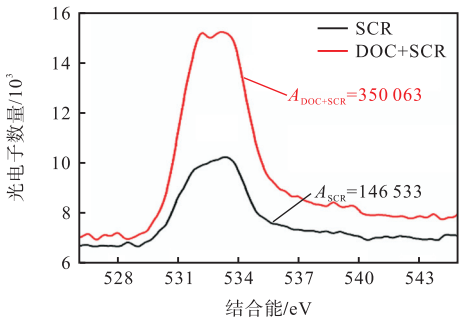
图 7 为不同后处理方式（SCR 和 DOC + SCR）下 PM 的 XPS 表征结果，对比了碳元素（C 1s）和氧元素（O 1s）的含量. 图 7(a) 和图 7(b) 对比了 C 1s 和 O 1s 的特征峰积分面积 A. PM 经过 DOC 处理后，碳元素含量降低，氧元素含量增加，氧与碳的面积比值（A_O/A_C）由 0.089 11 提升至 0.210 89，增加了 2.4 倍. 这说明 PM 经过 DOC 时，颗粒表面发生了较强的氧化作用，消耗了部分碳，形成了较多的含氧官能团. 此外，在颗粒氧化初始阶段，形成的较短微晶提供了大量的活性位点，这些位点可以吸附尾气中大量的氧气，也会导致 A_O/A_C 值大幅度增加. A_O/A_C 值增加表明含氧官能团含量的上升，PM 的氧化活性增强. 具体含氧官能团种类的变化规律，需要对 XPS 图谱中 C 1s 峰的精细扫描图谱进行深入分析.

XPS 图谱中 C 1s 峰的精细图谱扫描结果如图 8 所示，分峰拟合过程中主要分为 3 种碳原子的杂化形式（SP、SP^2 和 SP^3 杂化）、C—OH 官能团、C=O 官能

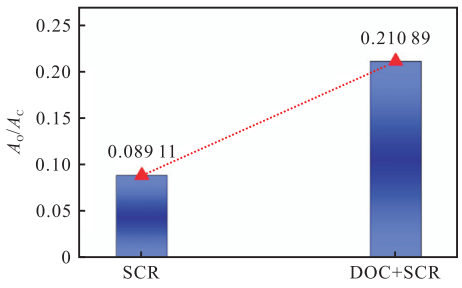
团和 COO 官能团. 经过 DOC 处理的 PM，C—O 官能团的占比提高了一倍，COO 官能团占比增加了 20%，而 C=O 官能团含量相对下降. 在 PM 表面官能团的相关研究中，C—OH 官能团是颗粒表面主要的含氧官能团（含量为 6.10% ~ 10.57%），这可能与该官能团的热稳定性有关. 因此，PM 在流经 DOC 时发生的表面氧化过程中形成大量 C—OH 官能团. C=O 官能团的热稳定性较差，DOC 内部的氧化放热反应会导致温度上升，破坏部分 C=O 官能团，呈现出下降趋势.



（a）C 1s



（b）O 1s



（c）A_O/A_C

图 7　XPS 表征结果中碳和氧元素含量

Fig.7　Carbon and oxygen elemental content in XPS characterization

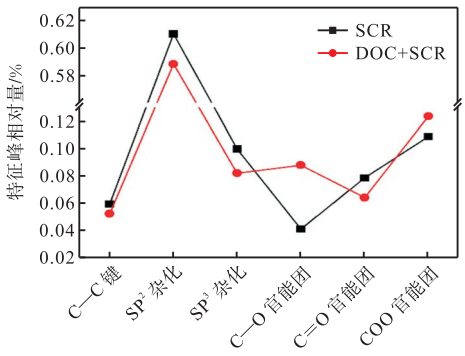


图 8　C 1s 峰精细谱扫描结果

Fig.8　Peak of C 1s fine map scanning

此外，图 5 测试结果也表明，经过 DOC 后颗粒的石墨化程度减小，碳微晶层边缘处的供给的碳原子增加，使得 COO 官能团和 C—OH 官能团的含量增加.

Wang[16]认为 C—H 官能团是 PM 外壳结构的主要成分，含量的变化直接影响着颗粒的微观结构和表面氧化性. 图 9 为脂肪族 C—H 官能团和芳香族 C—H 官能团含量在两种后处理方式下变化趋势. PM 经过 DOC 处理后，脂肪族 C—H 官能团含量下降了约 50%，芳香族 C—H 官能团含量有少量的提升，增加幅度最大为 6%. 说明 PM 在 DOC 氧化过程中，主要是脂肪族 C—H 官能团进行氧化反应，芳香族 C—H 官能团的反应活性较低. 这是因为脂肪族 C—H 官能团是一种链状结构，其带有短支链的 C—H 具有更高的活性，更容易与氧气和自由基进行反应. C—H 官能团含量的下降说明颗粒在 DOC 中进行了较为强烈的氧化反应. 另外，作为 PM 生长过程中主要的影响物质，脂肪族 C—H 官能团含量的下降会进一步降低 PM 的形成几率. 在 PM 氧化反应中，芳香族 C—H 官能团热稳定较高，高温下不易分解；并且该类型官能团含量通常会与 PM 的石墨化程度呈现反比的趋势[16]；所以 DOC 降低了 PM 的石墨化程度，芳香族 C—H 官能团的含量少量提升 6%.

DOC 的应用会显著影响 PM 的官能团含量. DOC 会增加 PM 含氧官能团的含量，提升颗粒表面的氧化

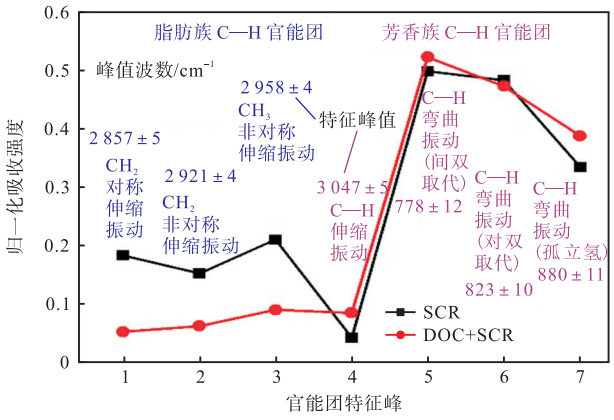


图 9　FTIR 表征结果中碳氢官能团含量对比

Fig.9　Comparison of hydrogen-containing functional groups in FTIR characterization results

特性，PM 更易处理. DOC 还会降低碳氢官能团的含量，尤其是脂肪族 C—H 官能团含量，会进一步抑制 PM 的生长或者聚集趋势.

3 结 论

（1）PM 流经 DOC 和 SCR 后颗粒的石墨化程度降低，颗粒内部有序和对称的碳晶结构发生坍塌和丢失，无序性增加，PM 整体的氧化活性得到了提升.

（2）PM 经过 DOC 和 SCR 后表面官能团的含量发生显著变化；作为 PM 生长核心的脂肪族 C—H 官能团被大量消耗，降低了 PM 的继续生长的机率；含氧官能团含量增加，PM 的氧化活性得以增强；在典型的船舶柴油机排放工况下 DOC 能有效降低船舶柴油机的 PM 排放，能进一步提高后处理系统的整体催化效率.

参考文献：

[1] Zhao Z，Zhang G，Liu J，et al. Latest research progresses in catalysts for the purification of exhaust gases from diesel engines[J]. Chinese Journal of Catalysis，2008，29：303-312.

[2] 孙豫，钱叶剑，唐彬彬，等. 船舶中速柴油机喷油正时优化研究[J]. 内燃机工程，2022，43(1)：8-17.

[3] 付垚，隆武强，冯立岩，等. 双层分流燃烧室内空间利用和喷雾分布的研究[J]. 内燃机学报，2020，38(3)：193-199.

[4] Wang Z，Zhang X，Guo J，et al. Particle emissions from a marine diesel engine burning two kinds of sulphur diesel oils with an EGR & scrubber system：Size，number & mass[J]. Process Safety and Environmental Protection，2022，163：94-104.

[5] 陈向阳，周梦祥，李青，等. 二聚环戊二烯掺混对正庚烷扩散火焰碳烟特性的影响[J]. 内燃机学报，2023，41(2)：131-140.

[6] Sapra H，Godjevac M，Visser K，et al. Experimental and simulation-based investigations of marine diesel engine performance against static back pressure[J]. Applied Energy，2017，204：78-92.

[7] Luján J M，Climent H，García-Cuevas L M，et al. Pollutant emissions and diesel oxidation catalyst performance at low ambient temperatures in transient load conditions[J]. Applied Thermal Engineering，2018，129：1527-1537.

[8] Liang X，Lv X，Wang Y，et al. Experimental investigation of diesel soot oxidation reactivity along the exhaust after-treatment system components[J]. Fuel，2021，302：121047.

[9] García A，Piqueras P，Monsalve-Serrano J，et al. Sizing a conventional diesel oxidation catalyst to be used for RCCI combustion under real driving conditions[J]. Applied Thermal Engineering，2018，140：62-72.

[10] Benajes J，García A，Monsalve-Serrano J，et al. Experimental investigation on the efficiency of a diesel oxidation catalyst in a medium-duty multi-cylinder RCCI engine[J]. Energy Conversion and Management，2018，176：1-10.

[11] Boutikos P，Březina J，Buzková Arvajová A，et al. Comparison of O_2 and NO_2 impact on PtO_x and PdO_x formation in diesel oxidation catalysts and their reduction by CO and C_3H_6 pulses[J]. Chemical Engineering Journal，2019，377：119654.

[12] Hu S，Deng B，Wu D，et al. Energy flow behavior and emission reduction of a turbo-charging and EGR non-road diesel engine equipped with DOC and DPF under NRTC(non-roadtransientcycle)[J]. Fuel，2021，305：121571.

[13] Leskovjan M，Kočí P，Maunula T. Simulation of diesel exhaust aftertreatment system DOC-pipe-SCR：The effects of Pt loading，PtO_x formation and pipe configuration on the de NO_x performance[J]. Chemical Engineering Science，2018，189：179-190.

[14] Liati A，Dimopoulos Eggenschwiler P，Schreiber D，et al. Variations in diesel soot reactivity along the exhaust after-treatment system，based on the morphology and nanostructure of primary soot particles[J]. Combustion and Flame，2013，160：671-681.

[15] Wang H，Gan H，Theotokatos G. Parametric investigation of pre-injection on the combustion，knocking and emissions behaviour of a large marine four-stroke dual-fuel engine[J]. Fuel，2020，281：118744.

[16] Wang H. Formation of nascent soot and other condensed-phase materials in flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute，2011，33：41-67.