

不同贵金属负载量催化型柴油机颗粒捕集器的催化性能

楼狄明¹, 赵瀛华¹, 冯 谦²

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300)

摘要: 设计了分别涂覆 15、25 和 35 g·ft⁻³ (1 ft = 0.304 8 m) 贵金属负载量的催化型柴油机颗粒捕集器(CDPF)样品。通过催化活性评价试验研究了不同贵金属负载量对 CDPF 的催化活性、抗劣化性以及选择性的影响。结果表明,随着贵金属负载量的增加,CDPF 新鲜样品对 CO 和 NO₂ 的活性依次降低,而对 C₃H₈ 的活性先升高后降低。与新鲜样品相比,随着贵金属负载量的增加,CDPF 老化样品对 CO 和 NO₂ 的活性具有较强的抗劣化性能。涂覆中等负载量贵金属的 CDPF 样品对 C₃H₈ 具有较好的活性和抗劣化性。新鲜样品对 CO 具有较高的选择性,老化样品对 CO 的转换率在低温范围时较低,而在中高温范围时较高。

关键词: 催化型柴油机颗粒捕集器(CDPF); 贵金属负载量; 催化活性; 抗劣化性; 选择性

中图分类号: TK421⁺.5

文献标志码: A

Catalytic Performance of CDPF with Different Precious Metal Catalyst Loadings

LOU Diming¹, ZHAO Yinghua¹, FENG Qian²

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: Catalyzed diesel particulate filter (CDPF) samples with 15, 25 and 35 g·ft⁻³ (1 ft = 0.304 8 m) precious metal catalyst loadings were designed to study the effects of precious metal catalyst loading on catalytic activity, degradation resistance and selectivity of CDPF by means of catalytic activity evaluation experiment. The results show that as precious metal catalyst loading increases, fresh CDPF samples present decreasing activity on CO and NO₂, and show increasing first and

then decreasing trend for the oxidation activity of C₃H₈. Compared with the fresh samples, as the precious metal catalyst loading increases, the aging CDPF samples have stronger degradation resistance performance on CO and NO₂. The CDPF coated medium precious metal catalyst loading has better activity and degradation resistance performance on C₃H₈. Fresh CDPF samples present strong selectivity on CO, while aging CDPF samples have worse selectivity at low temperature than that at medium and high temperature.

Key words: catalyzed diesel particulate filter(CDPF); precious metal catalyst loading; catalytic activity; degradation resistance; selectivity

柴油机由于热效率高、动力性好而被广泛应用于车辆、船舶等交通运输工具中。然而,柴油机颗粒排放问题较为严重,目前柴油机所使用的机内净化技术已经不能满足法规的要求。柴油机加装排气后处理装置是解决这一问题的有效手段^[1]。其中,柴油机氧化催化器(DOC)和催化型柴油机颗粒捕集器(CDPF)后处理技术^[1-2]是当今解决柴油机排放问题的研究热点。

CDPF是在柴油机颗粒捕集器(DPF)载体内部涂覆催化剂,从而降低干碳烟(soot)催化氧化燃烧的温度,实现颗粒捕集器的被动再生^[3]。研究表明,在加装DOC与CDPF后,柴油机排气颗粒物总数量下降明显,其中60~200 nm粒径范围的颗粒物数量浓度下降尤为显著^[4]。在CDPF技术中,催化剂组分及贵金属负载量对抗劣化性、催化活性的影响十分显著。文献[5]中研究了掺杂不同双金属氧化物

收稿日期: 2019-04-26

基金项目: 中国汽车技术研究中心重点课题(17180109)

第一作者: 楼狄明(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为汽车发动机替代燃料技术和发动机排放控制后处理技术。E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

通信作者: 赵瀛华(1996—),男,博士生,主要研究方向为汽车后处理系统及节能减排技术。

E-mail: Zhaoyinghua1996@163.com



论文
拓展
介绍

Fe₂O₃-CeO₂(Fe-Ce)、CeO₂-ZrO₂(Ce-Zr)和ZrO₂-Fe₂O₃(Zr-Fe)的CDPF样品,采用活性评价系统研究掺杂成分对CDPF催化性能的影响。文献[6]中分析了不同负载量贵金属CDPF对柴油公交车发动机颗粒多环芳香烃(PAHs)的影响,得出了贵金属负载量为25 g·ft⁻³(1 ft=0.304 8 m)的后处理装置对降低颗粒多环芳香烃(PAHs)毒性的能力都优于贵金属负载量分别为15、35 g·ft⁻³的后处理装置。文献[7]中研究了贵金属负载量对尾气中挥发性有机物(VOCs)组分排放特性的影响,得出贵金属负载量25 g·ft⁻³为最优的结论。目前CDPF中不同贵金属负载量对抗劣化性及催化活性的影响仍然缺乏足够的研究。

设计了CDPF载体表面分别涂覆15、25和35 g·ft⁻³贵金属负载量的样品,研究了不同贵金属负载量CDPF对催化活性的影响以及经高温水热老化后催化性能的衍变特征,最后分析了催化剂选择性。

1 试验

1.1 催化剂样品制备

采用等体积浸渍法进行不同贵金属负载量的CDPF样品制备。等体积浸渍法是将多孔载体与其正好可吸附体积的浸渍液相浸渍,采用该方法可以将精准调配的催化剂组分浆液完全涂覆在载体上,便于研究不同负载量催化剂组分的CDPF的催化性能。3种样品的催化剂组分和载体参数如表1所示。表1中,cpsi是指每平方英寸横截面上的孔道数。

表1 不同贵金属负载量CDPF样品参数
Tab.1 Parameters of CDPF samples with different precious metal catalyst loadings

| 项目 | 样品名称 | | |
|-------------------------------|--|------------------------|------------------------|
| | A1 | A2 | A3 |
| 主催化剂组分(质量比) | Pt: Pd: Rh (10:2:1) | Pt: Pd: Rh (10:2:1) | Pt: Pd: Rh (10:2:1) |
| 主催化剂负载量/(g·ft ⁻³) | 15 | 25 | 35 |
| 助催化剂组分(质量比) | Fe ₂ O ₃ -CeO ₂ (1:1) | | |
| 助催化剂负载量/(g·L ⁻¹) | 20 | | |
| 载体涂层 | γ-Al ₂ O ₃ | | |
| 载体孔密度/cpsi | 200 | | |
| 载体过滤层壁厚/mm | 0.35 | | |
| 载体孔隙率/% | 55 | | |
| 载体平均孔径/μm | 8~13 | | |
| 载体主要材料 | 堇青石 | | |

在制备样品名称分别为A1、A2和A3(贵金属负载量不同)的CDPF样品时,首先将一定量的γ-

Al₂O₃与硝酸和去离子水配制成载体涂层浆液,使用搅拌机进行2 h的搅拌,搅拌充分后再进行12 h的湿磨。完毕后,用浸渍法涂敷于200目的堇青石载体(Φ100 mm×80 mm)上,经1 h、125 ℃烘干处理后进行4 h、550 ℃焙烧处理。计算CDPF载体的可吸附浸渍液体积后,按照贵金属(Pt: Pd: Rh=10:2:1)负载量分别为15、25和35 g·ft⁻³以及定量Fe₂O₃的前驱体Fe(NO₃)₃和CeO₂的前驱体Ce(NO₃)₃配制成符合试验需求的主催化剂组分和助催化剂组分的催化剂浆料,对堇青石载体进行等体积浸渍涂敷,然后进行1 h、125 ℃烘干处理,以及550 ℃的焙烧固定涂层处理,得到贵金属负载量分别为15、25和35 g·ft⁻³的CDPF样品。

1.2 试验方法

1.2.1 高温水热老化处理方法

为了得到老化的CDPF样品,采用管式电阻老化炉对新鲜CDPF样品进行高温水热老化处理。老化炉的气体混合系统可将多种气体进行混合后通过样品。将高密度石英作为放置样品的反应管,该材料可以有效避免混合气体与反应管发生反应。此外,电阻炉中装有水鼓泡系统,可以在老化过程中加入水汽。目前,已有较多的文献对高温水热老化处理方法进行了深入研究,根据文献[8-11],将柴油车的水热老化条件设计为:温度750 ℃;时长20 h;气体流速40 000 h⁻¹;10%(体积分数)H₂O、10%(体积分数)O₂和5%(体积分数)CO₂,平衡气N₂。

1.2.2 催化活性评价试验

为研究不同贵金属负载量CDPF的催化活性,采用程序升温方法对CDPF样品进行活性评价。设计的活性评价装置分为3个部分,分别为配气单元、反应单元和分析单元,如图1所示。

模拟反应气体CO、C₃H₈、NO、O₂及N₂按照设定配气单元的浓度和流速经混合器混合,H₂O通过饱和蒸汽发生器呈气态后进入混合器,与混合器中的气体进行混合后进入反应单元。

反应单元为不锈钢材质,分内、外通道,外通道用来对进入的混合气进行预热,内通道用来放置载体样品。反应单元用程序控温电炉来控制反应温度。由于柴油机的排气温度多集中在150~400 ℃,因此程序升温范围控制在50~500 ℃,升温速率为5 ℃·min⁻¹。被检样品前放置热电偶以测量催化剂入口处的气体温度。

经反应单元的反应气体在除湿后进入分析单

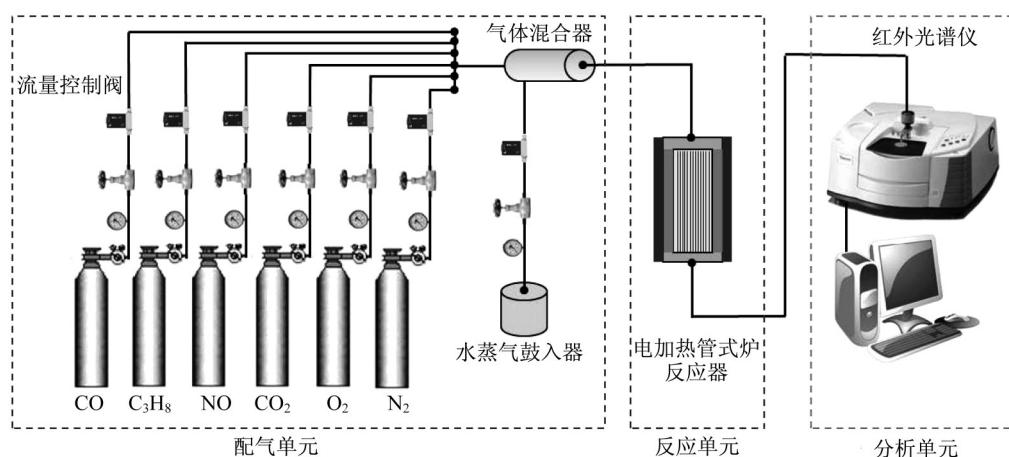


图1 CDPF 样品催化活性评价系统

Fig.1 Catalytic activity evaluation system of CDPF samples

元,通过 Thermo Scientific Nicolet iS10 傅里叶变换红外(FT-IR)光谱仪进行连续测试。活性测试前,在红外气体池中分别通入 CO、C₃H₈、NO 和 NO₂ 的标准气体,选择最大特征吸收峰进行积分计算,并分别绘制4种气体浓度与峰面积相关的标准曲线。活性测试时,通入模拟柴油车尾气,记录不同反应温度下4种气体红外峰面积的变化,并与标准曲线对比,计算相应温度下的气体转换率^[12]。CDPF 活性评价中模拟柴油机的的气体浓度和反应条件如表2所示。

表2 气体成分及相关试验参数

Tab.2 Gas component and related test parameters

| 参数 | 数值 |
|-----------------------------|---|
| 反应气体(体积分数) | CO(4×10 ⁻⁴)、C ₃ H ₈ (4×10 ⁻⁴)、NO(4×10 ⁻⁴)、CO ₂ (10 ⁻¹)、H ₂ O(5×10 ⁻²) |
| O ₂ 平衡系数 | 5 |
| 平衡气 | N ₂ |
| 气体流速/h ⁻¹ | 40 000 |
| 加热范围/℃ | 50~500 |
| 升温速率/(℃·min ⁻¹) | 5 |

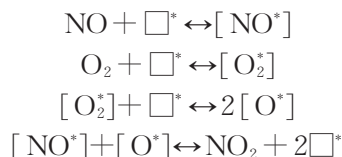
CDPF 样品对气体转换率的计算公式如下所示:

$$\eta = \frac{c_0 - c}{c_0} \times 100\%$$

式中: η 表示CO或C₃H₈的转换率; c 表示反应器出口CO或C₃H₈的浓度; c_0 表示原料气中CO或C₃H₈的浓度。

活性试验主要考察催化剂的活性,对NO的氧化能力是催化剂的一个重要性能指标,评价主要是通过NO₂的产率进行表征,因此主要关注NO₂。在NO氧化生成NO₂的反应中,包含NO和O₂的自反应、NO的催化氧化反应2个途径。在柴油机排放的NO_x中90%以上的成分为NO^[3];研究表明,NO

在流经DOC或CDPF载体时,在催化剂的作用下NO不能分解为N₂和O₂^[13]。NO催化氧化成NO₂的反应机理如下所示:



式中: \square^* 为活性位; $[\text{NO}^*]$ 、 $[\text{O}_2^*]$ 、 $[\text{O}^*]$ 为活性自由基。因此,定义CDPF样品对气体吸收率(产率)的计算式为

$$\theta = \frac{c}{c_{01} + c_{02}} \times 100\%$$

式中: θ 表示NO₂的产率; c 表示反应器出口NO₂的浓度; c_{01} 和 c_{02} 表示原料气中NO和NO₂的浓度。

1.2.3 CDPF 样品活性评价方法

CDPF 样品转化率的高低与温度有密切关系,CDPF 载体表面的催化剂只有在达到一定温度后才能发生催化氧化反应。转换率达到50%的温度称为起燃温度 T_{50} ,转换率随温度变化的曲线称为温升曲线。温升特性是CDPF催化性能的重要研究方法和考核指标,主要评价CDPF的低温活性、反应特性和对于不同物质的选择性^[14]。在研究中常用于评价催化性能的特征温度有起燃温度 T_{50} 和完全转化温度 T_{90} (转换率达到90%时的温度)。为了研究CDPF在更低温度的催化活性,引入 T_{10} (转换率达到10%时的温度)。需要说明的是,由于设计的CDPF样品对NO₂的最大产率控制在10%~30%,因此研究CDPF样品对NO₂产率时选用 T_{10} 、 T_{20} 和 T_{30} (转换率达到10%、20%和30%时的温度)作为特征温度进行分析。

2 结果与分析

2.1 CO活性及抗劣化性分析

图2~5分别为涂覆15、25和35 g·ft⁻³不同贵金属负载量的CDPF新鲜样品(分别简称为A1-Fresh、A2-Fresh和A3-Fresh,下同)和老化样品(分别简称为A1-Aged、A2-Aged和A3-Aged,下同)对CO转换率的温升曲线和特征温度。

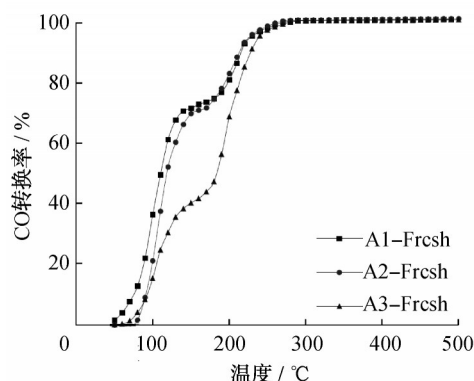


图2 新鲜样品对CO转换率的温升曲线

Fig.2 Temperature raising curves of fresh samples for CO conversion rate

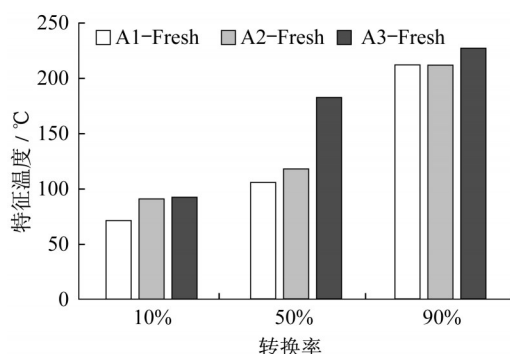


图3 新鲜样品对CO转换率的特征温度

Fig.3 Characteristic temperature of fresh samples for CO conversion rate

由图2可知,随着温度升高,CDPF新鲜样品对CO的转换率均呈增加趋势,CO转换率的温升曲线因贵金属负载量的不同而呈现不同的形状。在温度高于200℃时,温度升高初期,A1-Fresh对CO的转换率增加较快;A2-Fresh对CO的转换率起始温度较高,但增加速率较大,A3-Fresh在低温范围内对CO的转换率并无优势。从图3可知,A1-Fresh、A2-Fresh和A3-Fresh对CO的 T_{10} 依次增加,分别为74.4、90.7、92.3℃,贵金属负载量较低的A1-Fresh具有较好的CO低温活性。A1-Fresh、A2-

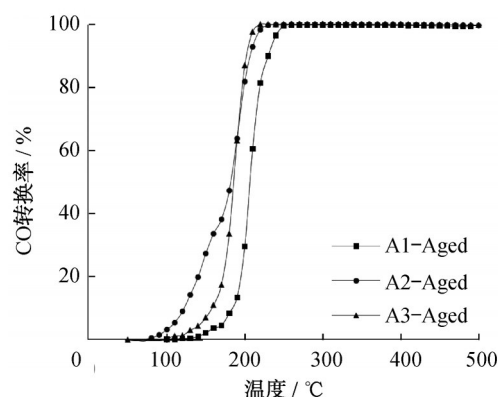


图4 老化样品对CO转换率的温升曲线

Fig.4 Temperature raising curves of aged samples for CO conversion rate

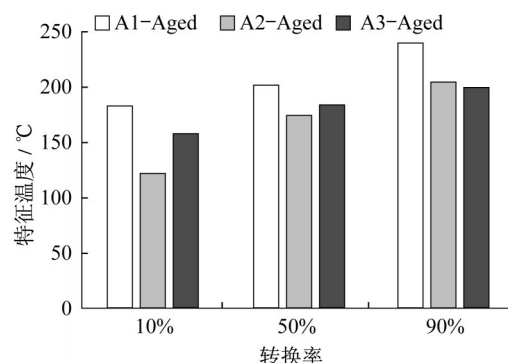


图5 老化样品对CO转换率的特征温度

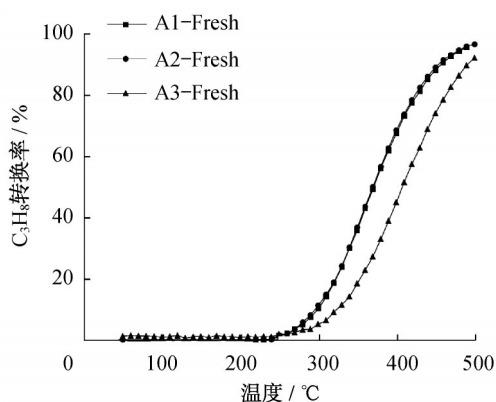
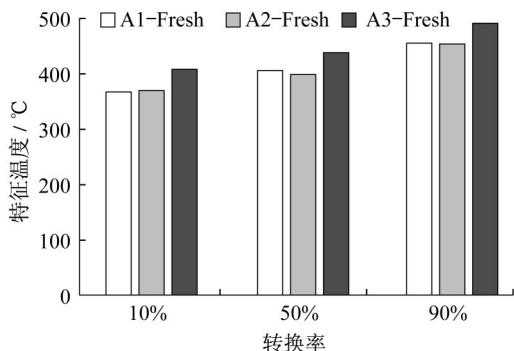
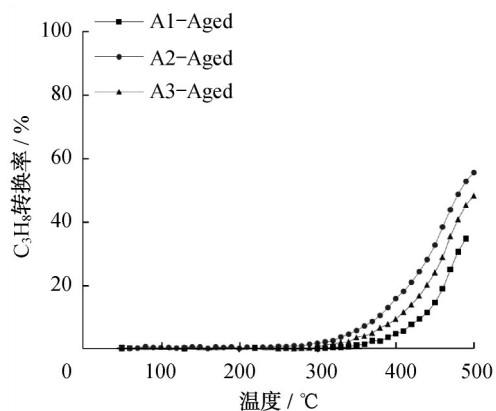
Fig.5 Characteristic temperature of aged samples for CO conversion rate

Fresh和A3-Fresh的起燃温度 T_{50} 依次增加,分别为110.3、118.4、182.8℃。A1-Fresh、A2-Fresh和A3-Fresh的完全转化温度 T_{90} 依次为215.3、212.8、227.7℃,A3-Fresh在中高温范围对CO的转换率升高较快。

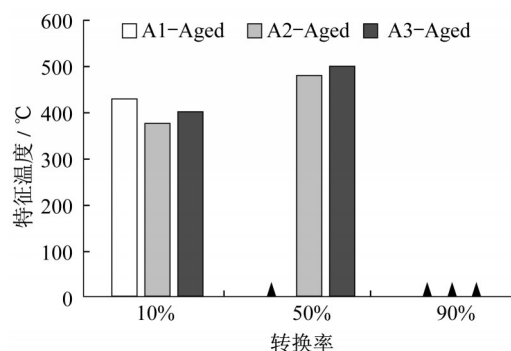
由图4可知,随着反应温度升高,CDPF老化样品对CO的温升曲线呈上升趋势。老化样品转换CO的起始温度均高于100℃。在温度高于200℃时,温度升高初期,A2-Aged对CO的转换率增加较快,当温度高于150℃后,A3-Aged对CO的转换率快速增加。由图5可知,A1-Aged、A2-Aged和A3-Aged对CO的 T_{10} 分别为183.2、121.9、157.5℃。与新鲜样品相比,A1-Aged、A2-Aged和A3-Aged的 T_{50} 分别升高96.3、63.2、2.7℃, T_{50} 劣化率分别为87.4%、53.4%、1.5%。

2.2 C₃H₈活性及抗劣化性分析

图6~9分别为涂覆15、25和35 g·ft⁻³不同贵金属负载量的CDPF新鲜样品和老化样品对C₃H₈转换率的温升曲线和特征温度。

图6 新鲜样品对C₃H₈转换率的升温曲线Fig.6 Temperature raising curves of fresh samples for C₃H₈ conversion rate图7 新鲜样品对C₃H₈转换率的特征温度Fig.7 Characteristic temperature of fresh samples for C₃H₈ conversion rate图8 老化样品对C₃H₈转换率的升温曲线Fig.8 Temperature raising curves of aged samples for C₃H₈ conversion rate

由图6可知,当温度高于250℃后,随着温度升高,A1-Fresh、A2-Fresh和A3-Fresh对C₃H₈的转换率迅速增加,A1-Fresh和A2-Fresh对C₃H₈的转换率基本一致,A3-Fresh的C₃H₈转换率略微低于A1-Fresh和A2-Fresh。由图7可知,A1-Fresh、A2-

图9 老化样品对C₃H₈转换率的特征温度(▲表示特征温度超过500℃)Fig.9 Characteristic temperature of aged samples for C₃H₈ conversion rate(▲ indicates that characteristic temperature is over 500℃)

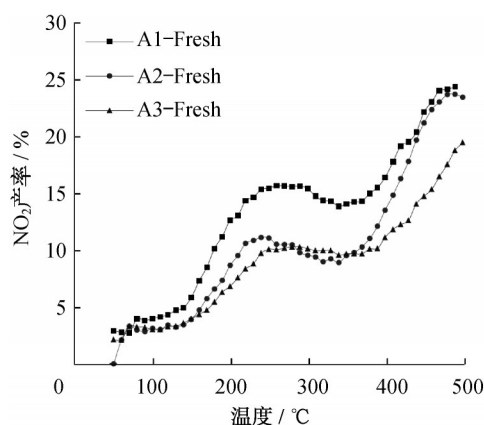
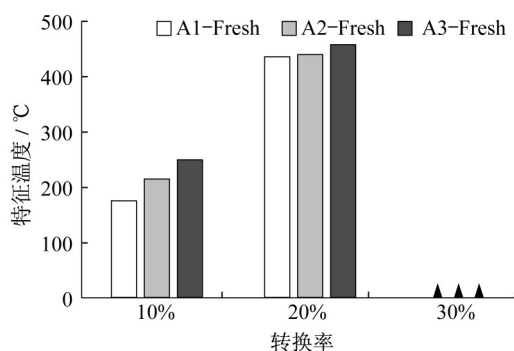
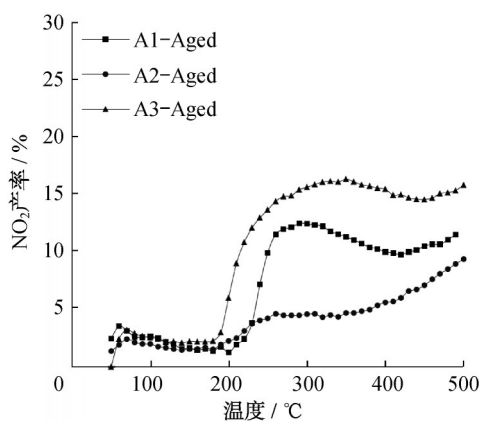
Fresh和A3-Fresh对C₃H₈的起燃温度 T_{50} 分别为371.0、369.9、407.5℃,A2-Fresh具有最低的C₃H₈起燃温度,A3-Fresh的起燃温度明显高于A1-Fresh和A2-Fresh。C₃H₈完全转化温度 T_{90} 分别为457.0、453.5、490.7℃,A2-Fresh具有略微低的 T_{90} 温度。

由图8可知,随着反应温度升高,当温度高于300℃后,老化样品对C₃H₈的转换率逐渐增加。由图9可知,A1-Aged、A2-Aged和A3-Aged对C₃H₈转换率达到10%时的 T_{10} 依次为433.6、377.7、403.2℃。老化样品对C₃H₈的最大转换率依次为37.2%、55.6%和48.3%,与新鲜样品相比,老化样品对C₃H₈的最大转换率的劣化率分别为61.1%、42.5%和47.7%。A2-Aged和A3-Aged对C₃H₈的起燃温度 T_{50} 分别为483.0、499.5℃,A2-Aged对C₃H₈具有较好的起燃特性和抗劣化性。

2.3 NO₂活性及抗劣化性分析

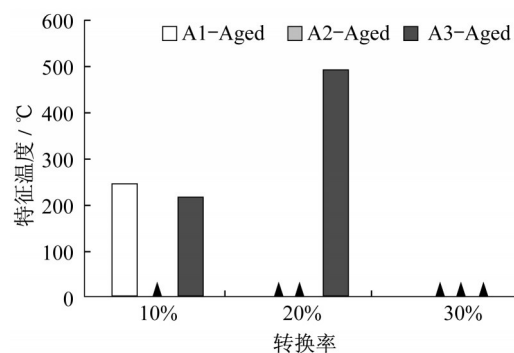
图10~13分别为涂覆不同贵金属负载量的新鲜样品以及老化样品对NO₂产率的升温曲线和特征温度。

由图10可见,随反应温度升高,CDPF新鲜样品的NO₂产率先增加,在200~300℃出现一个驼峰,随着温度继续升高,NO₂产率继续增加。在不同的温度范围,A1-Fresh的NO₂产率均高于A2-Fresh和A3-Fresh。由图11可见,A1-Fresh、A2-Fresh和A3-Fresh的NO₂产率为10%时的 T_{10} 依次增加,分别为178.5、215.0、249.2℃。3个样品的NO₂最高产率依次降低,分别为24.4%、23.8%和20.5%。A1-Fresh、A2-Fresh和A3-Fresh的NO₂产率达到20%时的 T_{20} 亦呈增加趋势,分别为435.1、441.8、457.5℃。随着贵金属负载量增加,CDPF新鲜样品

图10 新鲜样品对NO₂产率的温升曲线Fig.10 Temperature raising curves of fresh samples for NO₂ yield rate图11 新鲜样品对NO₂产率的特征温度(▲表示特征温度超过500℃)Fig.11 Characteristic temperature of fresh samples for NO₂ yield rate(▲ indicates that characteristic temperature is over 500℃)图12 老化样品对NO₂产率的温升曲线Fig.12 Temperature raising curves of aged samples for NO₂ yield rate

对NO₂产率的活性呈降低趋势。

由图12可见,随着温度升高,A1-Aged、A2-Aged和A3-Aged的NO₂产率温升曲线出现2个驼

图13 老化样品对NO₂产率的特征温度(▲表示特征温度超过500℃)Fig.13 Characteristic temperature of aged samples for NO₂ yield rate(▲ indicates that characteristic temperature is over 500℃)

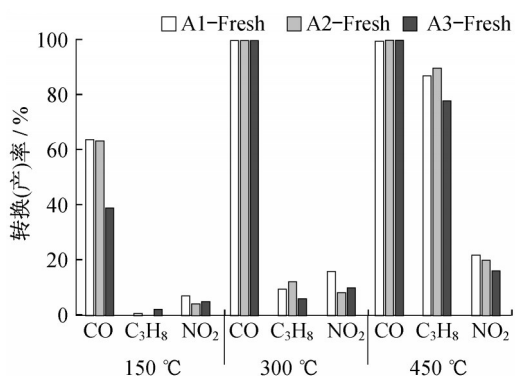
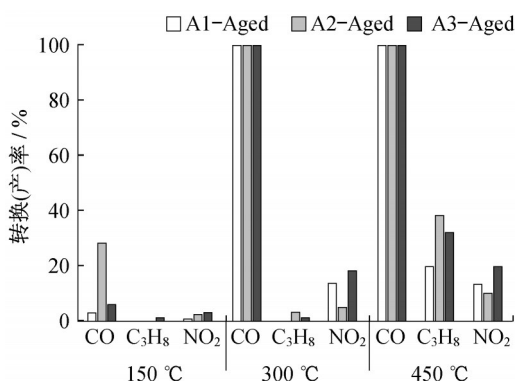
峰。在温度低于100℃时,由于NO的自氧化反应形成了NO₂产率小驼峰。在300℃左右,NO₂产率温升曲线出现明显的驼峰,该峰主要为催化氧化反应产生的NO₂。由图13可见,A1-Aged和A3-Aged对NO₂产率达到10%时的T₁₀分别为250.6、215.6℃,A1-Aged、A2-Aged和A3-Aged的NO₂最大产率分别为12.4%、9.3%和16.3%。与新鲜样品相比,3个老化样品NO₂最大产率劣化率分别为49.1%、60.7%和16.6%。A3-Aged对NO₂产率具有较好的抗劣化性,其次是A1-Aged。

2.4 CO、C₃H₈和NO₂的选择性分析

由于柴油车在市区和城郊受交通工况的制约,大多数情况处于低负荷运行工况,排气温度大多处于150~300℃,因此对CDPF样品在150、300、450℃工况的CO、C₃H₈和NO₂的转换率进行研究,分析涂覆不同贵金属负载量CDPF新鲜和老化样品对CO、C₃H₈和NO₂选择性的影响。

图14和图15分别为涂覆不同贵金属负载量的新鲜样品以及老化样品在150、300、450℃温度工况下对CO、C₃H₈和NO₂的转换(产)率。

在不同温度范围内,A1-Fresh、A2-Fresh和A3-Fresh对CO具有较高的选择性。在低温150℃左右时,随着贵金属负载量增加,催化剂样品对CO和NO₂的转换率呈降低趋势,对C₃H₈基本无活性。在中温300℃左右时,不同贵金属负载量的催化剂样品对CO具有较高的活性和选择性,而对C₃H₈和NO₂的选择性因贵金属负载量不同而异。A1-Fresh对C₃H₈的转换率为10.6%,而对NO₂的产率较高,为15.3%;A2-Fresh对C₃H₈的转换率较高,而对NO₂的产率较低。对比C₃H₈和NO₂的转换(产)率,

图14 新鲜样品对CO、C₃H₈和NO₂的选择性Fig.14 Selection of fresh samples for CO, C₃H₈ and NO₂图15 老化样品对CO、C₃H₈和NO₂的选择性Fig.15 Selection of aged samples for CO, C₃H₈ and NO₂

在300 °C左右,贵金属负载量低于25 g·ft⁻³时,CDPF新鲜样品对NO氧化成NO₂的反应具有较好的选择性;当贵金属负载量为25 g·ft⁻³时,CDPF新鲜样品对C₃H₈的选择性提高;贵金属负载量增加到35 g·ft⁻³时,CDPF新鲜样品对NO氧化成NO₂的选择性相对于C₃H₈有所增强。在高温450 °C左右,不同贵金属负载量的CDPF样品对C₃H₈和NO₂的转换(产)率均升高。与300 °C时的情况相似,在3个样品中,A2-Fresh对C₃H₈的转换率最高,其次是A1-Fresh,而A2-Fresh对NO₂的产率略低于A1-Fresh。综上所述,在不同温度范围时,CDPF新鲜样品对CO具有较高的选择性;在中高温范围时,A1-Fresh对NO₂的选择性较高,而A2-Fresh对C₃H₈的选择性较高;在不同的温度范围时,A3-Fresh对C₃H₈和NO₂的选择性均较低。

在低温150 °C左右,A1、A2和A3老化样品对CO、C₃H₈和NO₂的转换(产)率均较低,与新鲜样品相比,老化样品对CO的转换率明显降低,A2-Aged

对CO的转换率降低程度较小。在中温300 °C左右时,老化样品对CO的转换率较高,而对C₃H₈和NO₂的转换(产)率较低。与新鲜样品相比,老化样品对C₃H₈和NO₂的转换(产)率大多降低,而A3-Aged在该温度对NO₂的产率相对较高,其次是A1-Aged。相对于300 °C,老化样品在450 °C左右对C₃H₈的转换率有所提高,A1-Aged和A3-Aged对NO₂的产率有所降低。A2-Aged对C₃H₈的转换率较高,为33.0%,其次是A3-Aged。A2-Aged对NO₂的产率最低,A3-Aged对NO₂的产率最高,与A3-Fresh相比,A3-Aged对NO₂的产率有所升高。综上所述,在低温范围时,老化样品对CO的转换率明显降低;在中高温范围时,CO的转换率增加到较高水平;在中高温范围时,A2-Aged对C₃H₈的转换率依然相对于其他样品较高,而对NO₂的产率较低。相反,A3-Aged对C₃H₈的转换率较低,而对NO₂的产率较高,A1-Aged对C₃H₈和NO₂的转换(产)率处于中等水平。

3 结论

(1) 随着贵金属负载量增加,CDPF新鲜样品对CO和NO₂的活性均呈降低趋势。在150、300、450 °C时,CDPF新鲜样品对CO均有较高的转换率。在中高温范围时,A1-Fresh对NO₂的产率较高,而A2-Fresh对C₃H₈的转换率较高;在不同的温度范围时,A3-Fresh对C₃H₈和NO₂的转换(产)率均较低。A2-Fresh对C₃H₈的活性具有较好的抗劣化性,而贵金属负载量较高的A3-Fresh对CO和NO₂转换(产)率具有较好的抗劣化性。

(2) 在不同温度范围时,CDPF老化样品对CO具有较高的选择性;A3-Aged对C₃H₈和NO₂的选择性均较低。在中高温范围时,A3-Aged对NO₂的选择性较高,A1-Aged对C₃H₈和NO₂的转换(产)率处于中等水平;A2-Aged对C₃H₈的选择性较高,而对NO₂的产率较低;A3-Aged对C₃H₈的转换率较低,而对NO₂的产率较高。在低温范围时,老化样品对CO的选择性明显降低,而对CO的选择性在中高温范围时增加到较高水平。

参考文献:

- [1] 帅石金,唐韬,赵彦光,等. 柴油车排放法规及后处理技术的现状与展望[J]. 汽车安全与节能学报,2012,3(3): 200.
SHUAI Shijin, TANG Tao, ZHAO Yanguang, *et al.* State of

- the art and outlook of diesel emission regulations and aftertreatment technologies [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2012, 3(3): 200.
- [2] 楼狄明,万鹏,谭丕强,等. DOC+CDPF 配方对柴油公交车颗粒物排放特性影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(11): 3280.
LOU Diming, WAN Peng, TAN Piqiang, *et al.* Effects of formulations of DOC+CDPF on characteristics of particle emission from a diesel bus [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(11): 3280.
- [3] 冯谦. 柴油车催化型DPF的催化性能及应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
FENG Qian. Study on catalytic performance and application of diesel vehicle catalyzed DPF [D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [4] 谭丕强,张晓锋,胡志远,等. DOC+CDPF 对生物柴油燃烧颗粒物排放特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10): 2978.
TAN Piqiang, ZHANG Xiaofeng, HU Zhiyuan, *et al.* Effects of DOC+CDPF on particulate emission from a diesel engine with biodiesel fuel [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(10): 2978.
- [5] 王振东,张振,徐广新. 掺杂双金属氧化物对CDPF催化性能的影响[J]. *贵金属*, 2019, 40(1): 12.
WANG Zhendong, ZHANG Zhen, XU Guangxin. Effects of doped bimetal oxides on catalytic performance of CDPF [J]. *Precious Metals*, 2019, 40(1): 12.
- [6] 楼狄明,朱晓庆,刘影,等. CDPF 贵金属负载量对柴油公交车颗粒PAHs影响[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(1): 67.
LOU Diming, ZHU Xiaoqing, LIU Ying, *et al.* Effect of different metal loads of CDPF on particle PAHs emission from a diesel bus [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(1): 67.
- [7] 楼狄明,张子骏,刘继跃,等. 不同CDPF 贵金属负载量对柴油公交车VOCs组分排放影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 4983.
LOU Diming, ZHANG Zijun, LIU Jiyue, *et al.* Effect of different precious metal loads of CDPF on characteristic of VOCs emission from a diesel bus [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 4983.
- [8] ALEXANDR K, THOMAS H, COLTON S. Engine test for DOC quenching in DOC-DPF system for non-road applications [R]. Detroit: SAE, 2010.
- [9] TEUVO M, THOMAS W, AULI S. Performance and durability of Pt- and PtPd-DOC in diesel particulate filter applications with active regeneration [R]. Detroit: SAE, 2016.
- [10] DEVIN A, KENNETH P, THOMAS P. Four season field aging for SCR on DPF (SDPF) on a light heavy duty application [R]. Detroit: SAE, 2016.
- [11] FENG Q, SHEN S, LI M, *et al.* Catalytic characteristic and application performance of catalyzed DPFs coated with various content of precious metal in China [R]. Detroit: SAE, 2017.
- [12] CLERC J C. Catalytic diesel exhaust aftertreatment [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1996, 10(1/2/3): 99.
- [13] TWIGG M. Roles of catalytic oxidation in control of vehicle exhaust emissions [J]. *Catalysis Today*, 2006, 117(4): 407.
- [14] 王建昕,肖建华,李俊. 车用催化转化器的起燃特性及其评价试验方法[J]. *汽车工程*, 2000, 22(1): 25.
WANG Jianxin, XIAO Jianhua, LI Jun. A research on light-off performance and test method of automotive catalytic converter [J]. *Automotive Engineering*, 2000, 22(1): 25.

(上接第357页)

- (6): 83.
GAO Junliang, WANG Guoqing, PENG Yanzhong, *et al.* Application of improved data-driven stochastic subspace algorithm in bridge monitoring [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2012, 41(6): 83.
- [13] 胡怡然. 基于数据驱动的桥梁健康监测数据预处理[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
HU Yiran. Preprocessing of bridge health monitoring data based on data-driven [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [14] FAN X P, LIU Y F. Dynamic reliability prediction of bridge member based on Bayesian dynamic nonlinear model and monitored data [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(11): 1.
- [15] FAN X P. Bridge extreme stress prediction based on Bayesian dynamic linear models and non-uniform sampling[J]. *Structural Health Monitoring: An International Journal*, 2017, 16(3): 253.
- [16] 刘月飞,肖青凯,屈广,等. 无先验信息情况下基于解耦极值荷载效应的桥梁时变可靠性分析[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2018, 37(9): 1.
LIU Yuefei, XIAO Qingkai, QU Guang, *et al.* Time-dependent reliability analysis of bridges based on decoupled extreme load effects and no-prior distribution information [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2018, 37(9): 1.
- [17] SHUMWAY R H, STOFFER D S. Time series analysis and its applications with R examples [M]. New York: Springer, 2010.
- [18] WEST M, HARRISON J. Bayesian forecasting and dynamic models [M]. 2nd ed. New York: Springer, 1997.
- [19] ROSENBLATT M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function[J]. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1956, 27(3): 832.
- [20] 唐冲,惠辉辉. 基于Matlab的高斯曲线拟合求解[J]. *计算机与数字工程*, 2013, 41(8): 1262.
TANG Chong, HUI Huihui. Gauss curve fitting based on Matlab [J]. *Computer and Digital Engineering*, 2013, 41(8): 1262.