

汽油机颗粒捕集催化剂研究进展

赵德鹏, 杨冬霞*, 常仕英, 杜君臣, 赵云昆, 冯 丰

(昆明贵研催化剂有限责任公司 贵金属催化技术与应用国家地方联合工程实验室, 昆明 650106)

摘 要: 为了改善环境质量, 我国在 2020 年 7 月 1 日对轻型汽车排放的颗粒物进行限制。为了满足法规要求, 汽油机颗粒捕集催化剂技术被大量应用于汽油车后处理中。基于 2007 年以来 50 篇文献的分析, 本文总结了汽油机颗粒捕集催化剂在系统布局、铂族金属种类和浓度、涂层分布、背压、颗粒物捕集、积碳再生、灰分容量以及辅助气态污染物净化方面最新研究成果; 展望了汽油机颗粒捕集催化剂未来应用发展趋势。

关键词: 缸内直喷发动机; 背压; 汽油机颗粒捕集催化剂; 颗粒物捕集效率

中图分类号: TK411.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)03-0083-07

Research progress on catalyzed gasoline particulate filter

ZHAO Depeng, YANG Dongxia*, CHANG Shiyong, DU Junchen, ZHAO Yunkun, FENG Feng

(State-Local Joint Engineering Laboratory of Precious Metal Catalytic Technology and Application,

Kunming Sino-platinum Metals Catalysts Co. Ltd., Kunming 650106, China.)

Abstract: To improve ambient air quality, China have adopted regulations setting stringent limits on vehicular tailpipe emissions of particulates on July 1, 2020. To meet these regulations, the catalyzed gasoline particulate filters have heavily been applied to gasoline exhaust after-treatment. Based on the analysis of 50 literatures since 2007, this review summarizes representative studies on the system layouts, platinum group metal concentrations and species, washcoat distribution, back pressure, particulates filtration efficiency, soot regeneration, ash storage capacity and auxiliary gaseous pollutant purification, in the field of catalyzed gasoline particulate filters. The future application and developments are prospected.

Key words: gasoline direct injection; back pressure; catalyzed gasoline particulate filters; particulates filtration efficiency

汽油缸内直喷(GDI)发动机相比电喷(PFI)发动机, 能在各种工作状况之下拥有最高效的燃油利用率^[1], 降低二氧化碳(CO₂)以及冷启动和瞬态工况的碳氢化合物(HC)排放, 因此越来越受到人们的重视, 其销量逐年增加。虽然 GDI 发动机在燃油经济性、动力性和气态污染物排放方面相比 PFI 发动机具有无法比拟的优势, 但是由于 GDI 发动机将燃油直接喷射进入燃烧室, 会出现缸壁湿润现象, 导致部分燃料燃烧不完全会产生大量尺寸在 10~100 nm

之间颗粒物^[2]。

GDI 发动机颗粒物形成的主要原因可分为三种, 第一种是燃油喷射系统的影响, 通过优化喷射孔的数量、喷射模式、持续时间、喷射次数和燃油轨压力等, 可以大幅降低颗粒物初始排放^[3-5]。第二种是油品的影响, 燃油中的烯烃、芳香烃以及添加剂会导致颗粒物排放的增加^[6-15]。第三种是温度的影响, 在低温情况下, 发动机启动时燃料喷射进入燃烧室不均匀扩散等因素导致颗粒物排放量急剧升

收稿日期: 2022-07-20

基金项目: 移动源污染排放控制技术国家工程实验室开放基金项目(NELMS2019C02); 云南贵金属实验室科技计划项目(YPML-2022050212); 云南省重大科技专项(202102AB080007)

第一作者: 赵德鹏, 男, 高级工程师; 研究方向: 机动车尾气净化催化剂技术; E-mail: depeng.zhao@spmccatalyst.com

*通信作者: 杨冬霞, 女, 正高级工程师; 研究方向: 动车尾气净化催化剂技术; E-mail: doris.yang@spmccatalyst.com

高^[16-18]。

GDI 发动机排放的颗粒物包括碳烟、灰份、硫酸盐、可溶性有机物(SOF)、未燃烧的燃料、润滑油和其它成分。其中,碳烟和 SOF 是颗粒物的主要组成。碳烟能够长时间悬浮在空气中而且分解缓慢,对人类的健康构成严重的威胁。为了进一步提升环境质量,我国在 2020 年 7 月 1 日实施的第六阶段机动车污染物排放标准,对汽油车颗粒物排放的质量(PM)和数量(PN)进行限制,PM 排放 $<4.5 \text{ mg/km}$,PN 排放 $<6.0 \times 10^{11} \text{ 个/km}$ 。在 GDI 发动机原排无法满足法规要求时,通过加装颗粒捕集催化剂是有效降低 GDI 发动机尾气中的颗粒物主要手段。

1 催化剂的制造及影响因素

汽油机颗粒捕集催化剂是以堇青石、钛酸铝、碳化硅等材料作为基体并负载氧化铝、稀土、铂族金属或其他金属等活性组分,具有净化一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)和捕集颗粒的功能。

1.1 系统布局

汽油机颗粒捕集催化剂是一种降低颗粒物有效方法被大量应运到国六汽油车后处理系统中,其布局方式可分为三种,第一种安装在发动机出口位置,紧密耦合在三元催化剂后端,这种排布方式优点是积碳容易再生、带涂层颗粒捕集器对气态污染物具有很好的处理能力,缺点是背压较高会影响发动机高转速动力损失、颗粒物捕集效率低、发生故障不容易更换;第二种安装在底盘位置,其优点是颗粒物捕集效率高、背压比较低、发生故障容易更换,缺点是积碳不容易再生尤其是在高海拔严寒地区、需要增加主动再生装置;第三种是替代三元催化剂达到四元催化剂的功能,优点是整个后处理系统成本较低、积碳容易被动再生,缺点是背压比较高、对发动机原始气态排放要求较高^[19-20]。

Spiess 等^[21]研究了汽油机颗粒捕集催化剂(cGPF)和三元催化剂(TWC)之间的距离对 PN 排放的影响规律,随着 cGPF 和 TWC 距离的增加 PN 排放越来越低,作者认为尾气流速随着 cGPF 的安装距离的增大而变小是导致 PN 排放变小的主要原因。Jang 等^[22]在一款排量为 1.6 L 的 GDI 发动机汽油车测试 cGPF 在紧耦合和底盘位置对 PN 的影响,通过 FTP-75、US06 和 WLTP 三种测试循环发现,cGPF 在底盘位置对 PN 捕集效率比紧耦合位置高

20%~34%,作者认为紧耦合位置高空速以及无法形成碳烟层是导致 PN 捕集效率偏低的主要原因。杨冬霞等^[23]基于某市售 1.6 L 排量 GDI 发动机轿车,研究 cGPF 涂覆量对整车背压、PN 捕集效率和气态污染物排放的影响,结果表明,高涂覆量的 cGPF 会增加整车背压,能够提升 PN 的捕集效率,同时对气态污染物 NO_x 净化有帮助作用。李配楠等^[24]在一款 1.5TGDI 的汽油车上进行 WLTC 测试循环的排放试验,采用了带 cGPF 和不带 cGPF 的样件,试验结果表明,带 cGPF 催化剂后,PN 排放值降低了两个数量级,同时降低了 HC、CO 和 NO_x 气态污染物的浓度,尤其是 NO_x 降低到原来的 1/6。

1.2 铂族金属种类和浓度

为了同时满足 PN 和气态污染物控制,cGPF 涂层中含有一种或几种铂族金属,铂族金属主要以铂(Pt)、钯(Pd)和铑(Rh)为主。Nair 等^[25]在同等级负载量的 cGPF,涂层中 Pt/Pd/Rh 浓度为 0.0/5.0/0.3 g/L,研究载体壁厚对背压以及污染物排放的影响,结果表明,随着 cGPF 背压的增加 CO_2 排放也随之增加,但对 NO_x 转化有利。Yang 等^[26]在排量为 2.0 L 和 1.5 L 两款 GDI 汽油车上研究了加装 cGPF 对整车多环芳烃(PAHs)排放的影响,选用 cGPF 的 Pt/Pd/Rh 浓度为 0/0.8/0.2 g/L,结果表明,在整车底盘位置加装 cGPF 可显著减少 PAHs 排放,其中颗粒物中的多环芳烃减少了 97%~99%,气相中多环芳烃减少 54%~61%,硝基多环芳烃减少 56%~92%。杨冬霞等^[23]选用 2 种不同铂族金属含量的 cGPF,其中 cGPF1 铂族金属浓度约为 0.4 g/L, Pt/Pd/Rh 比例为 0/6/4; cGPF2 铂族金属浓度约为 0.7 g/L, Pt/Pd/Rh 比例为 0/12/8。研究结果表明,cGPF 的铂族金属浓度对 PN 捕集效率没有影响,但是高铂族金属 cGPF 能够提升 CO 和 NO_x 气态污染物的转化效率。Craig 等^[27]选用的 cGPF 的 Rh 含量约为 0.04 g/L 和 0.2 g/L 单金属 TWC 涂层,研究了催化剂直径和长度比例和目数对背压和 PN 排放的影响,结果表明,高目数催化剂直径和长度比例越大对 PN 排放有利,低目数催化剂直径和长度比对 PN 排放影响不大;催化剂直径和长度比例越大对后处理系统背压的影响也越低。

1.3 涂层分布类型

cGPF 涂层分布类型对后处理系统的背压和 PN 捕集效率具有很大的影响,要保证整车燃油经济性、动力性和 PN 排放水平,需要 cGPF 在背压和 PN 捕集效率两者之间进行权衡。Xia 等^[28]选用 cGPF 的

Pt/Pd/Rh 铂族金属浓度约为 0/0.2/0.07 g/L, 考察了 TWC 涂层分布类型(如图 1 所示)对 cGPF 背压的影响, 在涂覆量为 90 g/L 时涂覆技术 A 较涂覆技术 B 冷流背压增加了 15%, 主要原因是涂覆技术 A 的涂层部分分布在载体内壁孔道表面, 减小了 cGPF 开口面积、增加了孔道内壁的厚度, 气流在通过入催化剂内壁时, 口径变窄、路径变长, 导致气流阻力增大。

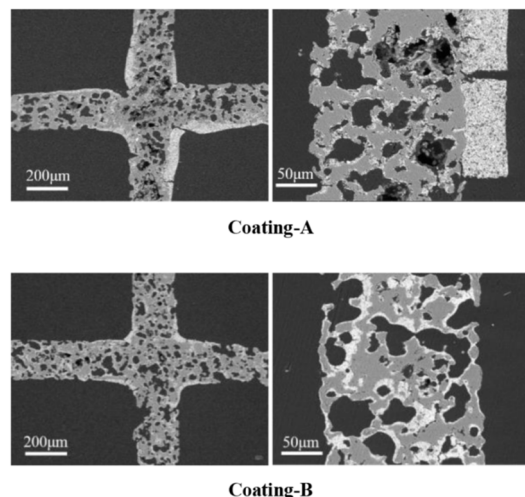


图 1 不同涂层分布 SEM 图^[28]

Fig.1 SEM analysis for different coating processes

Chen 等^[29]考察了 cGPF 载体的平均孔径、涂层分布类型和涂层负载量对 PN 捕集效率的影响, 将部分涂层涂敷在 cGPF 载体内壁孔道表面有利于提升催化剂的 PN 捕集效率, 不利于背压的控制; 在相同涂层载量下, cGPF 载体的平均孔径越小对 PN 捕集效率也越高, 但是背压也随之升高。杨冬霞等通过对浆料粒径、粘度和浆料涂覆抽吸压力的控制实现了涂层在 cGPF 载体孔道的不同分布类型^[23]。

1.4 背压和 PN 捕集效率的影响因素

cGPF 载体类型、涂层负载量、cGPF 安装位置和涂层分布类型等都会影响催化剂背压以及 PN 捕集效率。Ito 等^[30]研究了 cGPF 涂覆量对背压以及 PN 捕集效率的影响, 结果表明, 100 g/L 涂层负载量对不同平均孔径的催化剂背压影响最大; 催化剂平均孔径越小对减少 PN 排放越有利。Saito 等^[31]研究了 cGPF 载体的开口面积(OFA)对背压以及 PN 捕集效率的影响。结果表明, cGPF 载体开口面积越大, 背压和 PN 捕集效率也越低。总结了 cGPF 安装位置对背压、PN 排放和积碳再生的优劣势, 将催化剂安装在 TWC 紧耦合位置有利于积碳再生, 对背压和 PN 排放不利; 催化剂安装在在底盘位置

有利于背压和 PN 排放, 但是对积碳再生不利, 需要较高温度以及较高氧气含量才能实现积碳的快速再生。Inoda 等^[32]研究了涂层在 cGPF 分布对背压以及 PN 排放的影响, 结果表明, 涂层分布在 cGPF 载体孔道外壁(on-the-wall)对 cGPF 的背压不利, 但是对 PN 排放有利; 涂层分布在 cGPF 载体孔道内壁(in-the-wall)呈现相反的规律。

2 积碳和灰分对 cGPF 的影响

2.1 积碳

cGPF 能够顺利运行的关键点是实现积碳(碳烟)的顺利氧化。如果不定期对 cGPF 中的积碳进行处理, 会导致整车后处理系统压降增加, 致使车辆车载诊断系统(OBD)报警。cGPF 积碳再生策略可分为主动和被动再生, 主动再生依据汽油发动机高排温特点实现少量积碳(积碳量<2 g/L)的氧化; 被动再生是当排气系统背压或整车历程达到一定的值时, 整车行车电脑触发一个特定工况, 给 cGPF 提供一定的温度和氧气含量实现积碳快速清除。Morgan 等^[33]在一款 2.0LGDI 汽油车上进行 cGPF 积碳再生试验, 在断油工况下 cGPF 能够明显降低积碳再生温度, 570 °C时积碳已完全消失。Van 等^[34]开发出一种基于开环和压力的碳优化方法和再生控制策略, 实现对 cGPF 和发动机保护。Sharma 等^[35]研究发现碳烟的平均粒径以及比表面积影响其氧化速率, 小粒径和高比表面的碳烟容易被氧化。Achleitner 等^[36]使用延迟点火和二次空气喷射方法实现底盘位置 cGPF 积碳再生, 研究表明, 两个主动再生方法都能使 cGPF 温度达到 600 °C以上, 这个温度是实现积碳再生必备条件。在城市驾驶工况下这两种方法都会导致 CO₂ 和 NO_x 排放的增加, 但是二次空气喷射的 CO₂ 排放增加仅为 3.4%, 而延迟喷射为 33%。Bernardoff 等^[37]研究发现在缺氧条件下, 在高温条件下没有观察到碳烟再生现象, 使用二次空气喷射实现了碳烟氧化。Nicolin 等^[38]通过实验室模拟和车辆测试, 作者认为在高 O₂ 含量和低流量的断油工况下碳烟会被氧化。整车测试是在一辆带有模拟碳烟底盘位置 cGPF 上进行的, 以探索正常驾驶条件下的碳烟被动再生, 结果表明碳烟氧化速率和车速以及碳烟负载量成正比例关系。Ito 等^[30]用不带 TWC 涂层的 cGPF 研究了氧气浓度对碳烟氧化温度影响, 结果表明, 在 1.0%~1.6%氧含量下碳烟在 650 °C发生氧化, 当氧含量为 3.2%~5.2%时碳烟在 500 °C发生氧化。Seong 等^[39]研究发现灰分中

的钙具有氧化碳烟的作用,而磷会抑制碳烟的氧化。Wang 等^[40]研究表明积碳氧化速率和所用燃料以及发动机负荷有直接关系,碳烟氧化活化能从 83 kJ/mol 乙醇燃料将至 153 kJ/mol 汽油燃料;以汽油为主要燃料,降低发动机负荷,当平均有效缸压从 0.85 降到 0.55 MPa 时,碳烟氧化活化能降低 131 kJ/mol。Boger 等^[41]对比了 GDI 发动机积碳以及人造积碳氧化速率,研究表明人造积碳能够代表 GDI 发动机积碳。对比了 cGPF 在断油工况下积碳氧化产生的最高温度,发现 cGPF 具有更高的热熔,在 5 g/L 碳烟负载量下 cGPF 产生的最高温度近 1300 °C。对比了高速公路和城区道路驾驶对积碳再生的影响,发现车辆高速公路行驶有利于积碳再生。Spiess 等^[21]研究了在 NEDC 测试工况下,经过 34 次循环发现积碳和碳烟氧化达到了动态平衡。

2.2 灰分

随着整车里程的增加,对带有 cGPF 汽车会积累一些不可燃烧物质,统称为灰分。灰分主要由硫酸盐、磷酸盐、钙氧化物和锌、镁、铁及其他金属氧化物组成。主要来自燃烧室润滑油、发动机金属磨损和排气系统中金属腐蚀。灰分累计会增加 cGPF 背压,从而影响整车燃油经济性和功率输出,但是从 PN 角度出发,少量的灰分能够明显提高 cGPF 对 PN 的捕集效率。Ito 等^[30]考察了在 NEDC 和 WLTC 工况下,0~16 万千米整车耐久对 PN 排放的影响,对于加装 cGPF 车辆,随着里程增加 PN 排放随着减少,16 万千米相比 0 千米 PN 排放量减少了近 2 个数量级,这主要是灰分累积增加了 PN 的捕集效率。对 16 万千米里程 cGPF 进行 SEM 和 XRF 分析,灰分主要集中在出气端位置,其成分主要以 P_2O_5 、CaO 和 Fe_2O_3 为主,通过称重确定灰分重量为 22 g,略多于依据油耗计算值(18 g),作者认为这种差异是由于测试车辆动力总成、排气系统和其它部件的额外磨损造成的。Shao 等^[42]将两种润滑油分别以 1%量加入到汽油中,在模拟老化工况下考察不同配比润滑油燃烧后对 cGPF 性能影响,所用 cGPF 铂族金属负载量为 0.28 g/L, Pt/Pd/Rh 比例为 0/6/2,结果表明,随着耐久时间的增加, cGPF 对 PN 捕集效率随之增加,高灰分润滑油积累灰分速率最快。在整个模拟老化工况下考察了灰分和积碳对 cGPF 背压的贡献,同等重量下积碳背压是积灰背压的 10 倍以上。Custer 等^[43]通过试验预估 24 万千米会产生 47 g 灰分,通过 SEM 分析发现大部分灰分积累在催化剂孔道表面上。Lambert 等^[44]通过

研究耐久里程达到 21 和 24 万千米 cGPF,分析其灰分主要由 Ca、P、Zn、S、Fe 和 TWC 涂层组成,计算其每 1 万千米灰分积累量为 0.9~1.2 g,最终收集到 58~61 g 灰分,其中 60%~70%灰分聚集在催化剂孔道表面,平均灰分厚度为 12.4 μm ,孔道中灰分密度为 0.7 g/cm³,孔道表面灰分密度为 1.6 g/cm³。灰分对 cGPF 背压影响较大,相比新鲜态背压上升了 133%。Panchal 等^[45]研究发现灰分和高温老化对 cGPF 气态污染物的处理能力造成不可逆的影响。

3 颗粒捕集催化剂对整车油耗的影响

随着我国乘用车燃料消耗量限值标准的实施,整车厂会重点关注高燃油经济性,相关研究表明 cGPF 的使用,会影响发动机高转速下扭矩损失,但是对整车油耗影响较小。

Saito 等^[31]在一款 1.6 L 排量 GDI 汽油车研究 cGPF 对发动机功率和油耗影响,结果发现当背压增加到 10 kPa 时,在转速 3000 r/min 功率损失 0.7 kW,在转速 6000 r/min 功率损失 1.3 kW;在转速为 4000 r/min,扭矩为 89 Nm 没有发现油耗的增加,在转速为 5500 r/min,扭矩为 191 Nm 发现油耗增加了 1.9%。作者发现在 NEDC 工况下, cGPF 加装对发动机油耗和 CO₂ 排放没有影响。Ito 等^[30]在一款 1.4 L 排量 GDI 汽油车研究 cGPF 在 16 万千米耐久在 NEDC 和 WLTC 循环下对 CO₂ 排放没有影响,在全速全负荷工况下,16 万千米耐久后 cGPF 对发动机功率和扭矩有一定的影响。Richter 等^[46]在一款 2.0 L 排量 GDI 汽油车在 NEDC 工况下,加装 cGPF 后当车速在 100~120 km/h 阶段对油耗和 CO₂ 排放没有影响。Lambert 等^[44]所用两辆加装 cGPF 汽油车在 21 和 24 万千米耐久里程中,随着灰分积累也没发现油耗增加。

4 结语

在国六 A 阶段, cGPF 大量应用在 GDI 发动机排气系统中,但是随着法规逐渐加严, PFI 和混合动力(HEV)汽油发动机冷启动阶段的 PN 不容忽视, Czerwinski 等^[47]研究了 4 辆不同排量带涡轮增压器 PFI 发动机在 WLTC 工况下 PN 排放,其中 3 辆车 PN 排放超过 6.0×10^{11} 个/km。Ristimäki 等^[48]研究表明 PFI 发动机相比 GDI 发动机颗粒物的排放对环境温度敏感性更高,在 -7 °C 环境温度其 PN 排放量是 GDI 发动机的 2 倍。Zinola 等^[49]在一款 HEV 汽油

车进行试验,在NEDC工况下模拟发动机启停状态,整个工况发动机运行时间占比为28%,但是整个工况下PN排放是汽油发动机排放4.5倍。

目前国六标准主要是对23 nm以上的颗粒物排放进行限制,由于更小尺寸颗粒对人体危害最大,可能在未来排放法规中会加严对小于23 nm以下颗粒物控制。研究表明,cGPF是限制23 nm以下颗粒物排放有效手段,Czerwinski等^[50]通过5辆GDI汽油车研究,cGPF能够降低包括23 nm以下颗粒物的排放。

随着GDI发动机的普及和我国轻型汽车污染物排放法规的升级,cGPF在控制PN以及改善气态污染物具有明显优势,其逐渐成熟的市场应用经验,预计不久将来会逐渐应用到其它汽油发动机中。目前cGPF技术在不增加背压的前提下,提升小于23 nm颗粒物捕集效率是急需解决的关键问题;随着cGPF对颗粒物捕集效率不断提升势必会造成碳烟和灰分快速累计,因此需要不断提升发动机热效率和加快低灰分机油的应用是cGPF大量应用前提条件。

参考文献:

- [1] JOHNSON T, JOSHI A. Review of vehicle engine efficiency and emissions[J]. SAE International Journal of Engines, 2018-01-0329.
- [2] JOSHI A, JOHNSON T V. Gasoline particulate filters - A review[J]. Emission Control Science and Technology, 2018, 4(4): 219-239.
- [3] WHITAKER P, KAPUS P, OGRIS M, et al. Measures to reduce particulate emissions from gasoline DI engines[J]. SAE International Journal of Engines, 2011-01-1219.
- [4] MCNEIL S, ADAMOVICZ P, LIEDER F. Bosch motronic MED9.6.1 EMS applied on a 3.6 L DOHC 4V V6 direct injection engine[R]. SAE Technical Paper, 2008-01-0133.
- [5] PEER J, BACKES F, SAUERLAND H, et al. Development of a high turbulence, low particle number, high injection pressure gasoline direct injection combustion system[J]. SAE International Journal of Engines, 2016-01-9046.
- [6] BUTLER A D, SOBOTOWSKI R A, HOFFMAN G J, et al. Influence of fuel PM index and ethanol content on particulate emissions from light-duty gasoline vehicles[R]. SAE Technical Paper, 2015-01-1072.
- [7] QIN J, LI X, PEI Y. Effects of combustion parameters and lubricating oil on particulate matter emissions from a turbo-charged GDI engine fueled with methanol/gasoline blends[R]. SAE Technical Paper, 2014-01-2841.
- [8] CHAN T W, SAFFARIPOUR M, LIU F, et al. Characterization of real-time particle emissions from a gasoline direct injection vehicle equipped with a catalyzed gasoline particulate filter during filter regeneration[J]. Emission Control Science and Technology, 2016, 2(2): 75-88.
- [9] AIKAWA K, SAKURAI T, JETTER J J. Development of a predictive model for gasoline vehicle particulate matter emissions[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2010-01-2115.
- [10] KHALEK I A, BOUGHER T, JETTER J J. Particle emissions from a 2009 gasoline direct injection engine using different commercially available fuels[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2010-01-2117.
- [11] KIM Y, KIM Y, KANG J, et al. Fuel effect on particle emissions of a direct injection engine[R]. SAE Technical Papers, 2013-01-1559.
- [12] 郑荣, 李梦仁, 王银辉, 等. 燃油组分对汽油机颗粒物及可挥发性有机物排放的影响[J]. 内燃机学报, 2016, 34(1): 32-40.
- [13] 王银辉, 帅石金, 张文彬, 等. 油品影响直喷汽油机一次颗粒物排放和二次颗粒物生成的研究进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(4): 355-370.
- [14] ZHENG R, LI M R, WANG Y H, et al. Impact of fuel components on PM and VOCs emissions from gasoline engines[J]. Transactions of Csice, 2016, 34(1): 32-40.
- [15] WANG Y H, SHUAI S J, ZHANG W B, et al. Review of fuel impacting on primary particulate emissions and secondary particulate formation from gasoline direct injection engines[J]. Automotone Safety and Energy, 2016, 7(4): 355-370.
- [16] KLEEMAN M J, RIDDLE S G, ROBERT M A, et al. Lubricating oil and fuel contributions to particulate matter emissions from light-duty gasoline and heavy-duty diesel vehicles[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(1): 235-242.
- [17] DE ALBUQUERQUE P C C, DE ANDRADE ÁVILA R N, ZÁRANTE P H B, et al. Lubricating oil influence on exhaust hydrocarbon emissions from a gasoline fueled engine[J]. Tribology International, 2011, 44(12): 1796-1799.
- [18] PRICE P, STONE R, OUDENIJEWEME D, et al. Cold

- start particulate emissions from a second generation DI gasoline engine[R]. SAE Technical Paper, 2007-01-1931.
- [17] 解难, 李昌, 胡月昆, 等. 环境温度对缸内直喷汽油车颗粒物排放特性的影响[J]. 车用发动机, 2015(2): 49-52.
- XIE N, LI C, HU Y K, et al. Effect of ambient temperature on particulate emission characteristics of GDI passenger car[J]. Vehicle Engine, 2015(2): 49-52.
- [18] 胡志远, 宋博, 胡雷, 等. 缸内直喷型汽油车起动工况颗粒组分排放特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 261-266.
- HU Z Y, SONG B, HU L, et al. Effects of start conditions on the composition of particle emissions from a gasoline direct injection vehicle[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(2): 261-266.
- [19] JOSHI A, BRONFENBRENNER D, TANNER C, et al. High porosity substrate and filter technologies for advanced gasoline applications[C]//15th Hyundai Kia International Powertrain Conference, Seoul, Korea, 2015.
- [20] 赵德鹏, 杨冬霞, 贺小昆, 等. 一种汽油车颗粒捕集催化器及其制备方法: ZL 201810762587.8[P]. 2021-03-23.
- ZHAO D P, YANG D X, HE X K, et al. Gasoline car particulate trap catalytic converter and preparation method thereof: ZL 201810762587.8[P]. 2021-03-23.
- [21] SPIESS S, WONG K F, RICHTER J M, et al. Investigations of emission control systems for gasoline direct injection engines with a focus on removal of particulate emissions[J]. Topics in Catalysis, 2013, 56(1): 434-439.
- [22] JANG J, LEE J, CHOI Y, et al. Reduction of particle emissions from gasoline vehicles with direct fuel injection systems using a gasoline particulate filter[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 1418-1428.
- [23] 杨冬霞, 夏文正, 袁新波, 等. 催化型汽油机颗粒过滤捕集器催化剂设计与应用性能研究[J]. 内燃机工程, 2020, 41(1): 86-92.
- YANG D X, XIA W Z, YUAN X B, et al. Study on design and application of a catalyzed gasoline particulate filter[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineerin, 2020, 41(1): 86-92.
- [24] 李配楠, 程晓章, 骆洪燕, 等. 基于国六标准的汽油机颗粒捕集器(GPF)的试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2017, 34(1): 1-5.
- LI P N, CHENG X Z, LUO H Y, et al. The experimental study of gasoline particulate filter (GPF) for China 6 standard[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2017, 34(1): 1-5.
- [25] NAIR A R, SCHUBRING B, PREMCHAND K, et al. Methodology to determine the effective volume of gasoline particulate filter technology on criteria emissions [R]. SAE Technical Paper, 2016-01-0936.
- [26] YANG J, ROTH P, DURBIN T D, et al. Gasoline particulate filters as an effective tool to reduce particulate and polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from gasoline direct injection (GDI) vehicles: A case study with two GDI vehicles[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(5): 3275-3284.
- [27] CRAIG A, WARKINS J, ARAVELLI K, et al. Low cost LEV-III, TIER-III emission solutions with particulate control using advanced catalysts and substrates[J]. SAE International Journal of Engines, 2016-01-0925.
- [28] XIA W, YUAN X, YANG D, et al. Design of catalyzed gasoline particulate filter (cGPF) and investigation of its durability performance using accelerated engine aging[R]. SAE Technical Paper, 2019-01-0970.
- [29] CHEN J, HE S, XIA W, et al. Coated gasoline particulate filter technology development to meet china6 PN regulation[R]. SAE Technical Paper, 2020-01-0387.
- [30] ITO Y, SHIMODA T, AOKI T, et al. Next generation of ceramic wall flow gasoline particulate filter with integrated three way catalyst[R]. SAE Technical Paper, 2015-01-1073.
- [31] SAITO C, NAKATANI T, MIYAIRI Y, et al. New particulate filter concept to reduce particle number emissions[R]. SAE Technical Paper, 2011-01-0814.
- [32] INODA S, NOMURA Y, ORI H, et al. Development of new coating technology optimized for each function of coated GPF[R]. SAE Technical Paper, 2017-01-0929.
- [33] MORGAN C. Platinum group metal and washcoat chemistry effects on coated gasoline particulate filter design[J]. Johnson Matthey Technology Review, 2015, 59(3): 188-192.
- [34] VAN NIEUWSTADT M, ULREY J. Control strategies for gasoline particulate filters[R]. SAE Technical Paper, 2017-01-0931.
- [35] SHARMA H N, PAHALAGEDARA L, JOSHI A, et al. Experimental study of carbon black and diesel engine soot oxidation kinetics using thermogravimetric analysis[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(9): 5613-5625.
- [36] ACHLEITNER E, FRENZEL H, GRIMM J, et al. System approach for a vehicle with gasoline direct injection and

- particulate filter for RDE[C]//International Vienna Motor Symposium, Vienna, 2018.
- [37] BERNARDOFF R, HENNEBERT B, DELVIGNE T, et al. A study of ash accumulation in the after-treatment system of a gasoline direct injection engine equipped with a gasoline particulate filter[R]. Wcx™ 17: SAE World Congress Experience, 2017-01-0879.
- [38] NICOLIN P, ROSE D, KUNATH F, et al. Modeling of the soot oxidation in gasoline particulate filters[J]. SAE International Journal of Engines, 2015-01-1048.
- [39] SEONG H J, LEE K, CHOI S. Effects of engine operating parameters on morphology of particulates from a gasoline direct injection (GDI) engine[R]. SAE Technical Paper, 2013-01-2574.
- [40] WANG C, XU H, HERREROS J M, et al. Fuel effect on particulate matter composition and soot oxidation in a direct-injection spark ignition (DISI) engine[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(3): 2003-2012.
- [41] BOGER T, ROSE D, NICOLIN P, et al. Oxidation of soot (Printex® U) in particulate filters operated on gasoline engines[J]. Emission Control Science and Technology, 2015, 1(1): 49-63.
- [42] SHAO H, CARPENTIER G, YIN D, et al. Engine accelerated aging method developed to study the effect of lubricant formulations on catalyzed gasoline particulate filter durability[R]. SAE Technical Paper, 2018-01-1804.
- [43] CUSTER N, KAMP C J, SAPPOK A, et al. Lubricant-derived ash impact on gasoline particulate filter performance[J]. SAE International Journal of Engines, 2016-01-0942.
- [44] LAMBERT C K, BUMBAROSKA M, DOBSON D, et al. Analysis of high mileage gasoline exhaust particle filters[J]. SAE International Journal of Engines, 2016-01-0941.
- [45] PANCHAL M, CALLISON J, SKUKAUSKAS V, et al. Operando XAFS investigation on the effect of ash deposition on three-way catalyst used in gasoline particulate filters and the effect of the manufacturing process on the catalytic activity[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2021, 33(28): 284001.
- [46] RICHTER J M, KLINGMANN R, SPIESS S, et al. Application of catalyzed gasoline particulate filters to GDI vehicles[J]. SAE International Journal of Engines, 2012-01-1244.
- [47] CZERWINSKI J, COMTE P, ENGELMANN D, et al. PN-emissions of gasoline cars MPI and potentials of GPF[R]. SAE Technical Paper, 2018-01-0363.
- [48] RISTIMÄKI J, KESKINEN J, VIRTANEN A, et al. Cold temperature PM emissions measurement: Method evaluation and application to light duty vehicles[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(24): 9424-9430.
- [49] ZINOLA S, RAUX S, LEBLANC M. Persistent particle number emissions sources at the tailpipe of combustion engines[R]. SAE Technical Paper, 2016-01-2283.
- [50] CZERWINSKI J, COMTE P, HEEB N, et al. Nanoparticle emissions of DI gasoline cars with/without GPF[R]. SAE Technical Paper, 2017-01-1004.
- *****
- 【上接第82页】**
- [39] RICOH CO LTD. Picture processing device: JP1988 240937[P]. 1990-03-30.
- [40] ZHANG R W, MOON K S, LIN W, et al. A simple, low-cost approach to prepare flexible highly conductive polymer composites by in situ reduction of silver carboxylate for flexible electronic applications[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(4): 528-534.
- [41] 吴建明. 当前技术水平的干式分级设备[J]. 有色金属(选矿部分), 2010(5): 25-29.
- WU J M. Dry classifying equipments at the present state of the arts[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2010(5): 25-29.
- [42] 孙征, 古绍波, 朱俊杰. 一种银粉分级过筛装置: CN 206794140U[P]. 2017-12-26.
- [43] 邱衍嵩, 梁炳联, 姜红涛. 一种银粉高效粉碎分级过筛装置: CN214183372U[P]. 2021-09-14.
- [44] 王彦军, 刘葵, 王爱平, 等. 超细银粉生产中气流分级工艺的改进[J]. 有色金属, 2007(4): 56-59.
- WANG Y J, LIU K, WANG A P, et al. Technology improvement on air-classification in superfine zinc powder production[J]. Nonferrous Metals, 2007, 59(4): 56-59.
- [45] 哈敏, 郑伟, 李广坤, 等. 超细微米球形银粉的气流分级实践[J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(5): 81-84.
- HA M, ZHENG W, LI G K, et al. Airflow classification practice of ultra-fine micron spherical silver powder[J]. Powder Metallurgy Industry, 2018, 28(5): 81-84.
- [46] 陈静升, 赵超, 毛磊磊. 一种微细银粉气流解聚和精细分级的装置: CN216538827U[P]. 2022-05-17.