

碳达峰目标下的汽车颗粒物排放及控制

李新

(武昌首义学院机电与自动化学院, 湖北武汉 430064)

【摘要】 汽车产业碳达峰目标的确定加速了汽车电动化转型的步伐。随着电动汽车逐年增多, 由制动磨损、轮胎与路面磨损、路面扬尘等产生的非尾气排放颗粒物污染防治越来越受到重视。汽车尾气排放颗粒物主要由燃烧产生, 位置与形式相对单一; 而非尾气排放颗粒物主要由摩擦副摩擦产生, 位置分散, 成分复杂。虽然电动汽车近年来发展迅猛, 并且多年来的尾气排放治理已使得尾气颗粒物排放处于较低水平, 但传统燃油车保有量仍占有绝对优势, 在突出和加快非尾气颗粒物排放控制的同时, 尾气颗粒物排放依然需要引起足够重视。本文建议, 在延续尾气排放治理经验基础之上, 进一步从政策法规、工程技术、交通管理三个方面着眼, 多角度协同控制, 加强汽车颗粒物排放控制。

【关键词】 颗粒物; 汽车; 非尾气排放; 碳达峰

【中图分类号】 X513

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252 (2022) 03-0066-07

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.03.066

引言

在大气 PM_{2.5} 来源解析中, 汽车颗粒物排放占据着重要地位; 从近年研究数据来看, 受工业化水平及地域条件等影响, PM_{2.5} 贡献率基本在 10%~27% 的水平^[1-5]。汽车排放颗粒物可分为两类: 一类是传统燃油汽车发动机工作过程中由燃烧产生的尾气颗粒物 (Exhaust Emission, EE), 另一类是汽车在运行过程中由制动器磨损、轮胎与路面磨损以及路面扬尘等带来的非尾气颗粒物 (Non-Exhaust Emission, NEE)。随着汽车产业碳达峰目标的提出^[6] (中国于 2028 年左右达到峰值), 汽车产品结构的变化将给汽车颗粒物控制带来新的挑战。

汽车碳排放涵盖汽车生产、使用、报废整个生命周期过程, 其中使用阶段由汽柴油等化石燃料燃烧所产生的碳排放占到了 90% 以上^[7]。因此, 碳达峰路径中首要的就是降低燃油汽车保有量占比, 大力发展以纯电动汽车为代表的新能源汽车。其次, 要持续降低汽车油耗水平。再次, 要从合理优化配置交通资源、强化交通管理的角度降低汽车碳排放。

上述碳达峰路径措施使汽车颗粒物排放呈现三个新的特征: 一是电动汽车的发展强化了对非尾气颗粒物排放的重视; 二是油耗的降低改变了颗粒物排放特征, 如燃油发动机先进技术的应用改变了尾气颗粒物性质, 汽车小型化、轻量化降低了整体颗粒物排放

等; 三是交通运输管理的提升改变了颗粒物排放的时空分布及排放量。结合当前新能源汽车保有量占比较低这一现状, 以及传统燃油汽车退出时间——中国预计在 2050 年才能实现传统燃油车的全面退出^[8], 碳达峰目标下的汽车颗粒物排放问题仍需从尾气与非尾气两个方面加以解决。针对新特征, 突出和加快非尾气颗粒物排放的控制, 从政策法规、工程技术、交通管理三个方面强化重点区域、重点时段、重点领域的综合治理。

1 颗粒物排放标准

为减少尾气颗粒物排放对大气的污染, 许多国家和地区都以立法的形式加强控制 (图 1)。

法规的发展有效降低了单车尾气颗粒物排放量。就轻型车而言, 尾气颗粒物排放限值从 10 年前的 25 mg/km (国 4 第一类车) 下降到了现在的 4.5 mg/km (国 6a 第一类车), 降幅达 82%。为满足法规要求, 各大汽车厂商持续加大研发力度, 不断从发动机技术、尾气后处理技术等多角度入手, 降低颗粒物排放。虽然近 10 年来, 我国汽车保有量持续增长, 由 2009 年的 6209.4 万辆, 增长到了 2020 年 28 100 万辆, 但颗粒物排放一直处于相对稳定水平。同时, 法规的发展实施引起整个市场的结构性调整, 冲击行业产出, 影响市场需求, 从降低汽车保有量、减少汽车实际行驶里程两个方面有效降低颗粒物排放^[9]。

与尾气颗粒物排放不同, 非尾气颗粒物排放成

资助项目: 武昌首义学院博士启动基金项目 (B20200202)。

作者简介: 李新 (1980—), 男, 讲师, 研究方向为汽车排放控制, E-mail: lixin_whutqy@126.com。

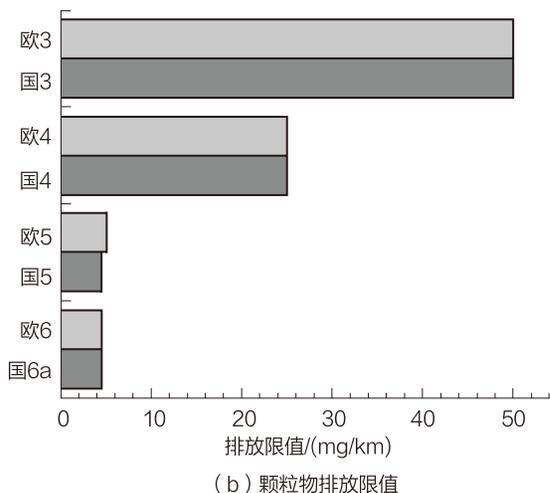
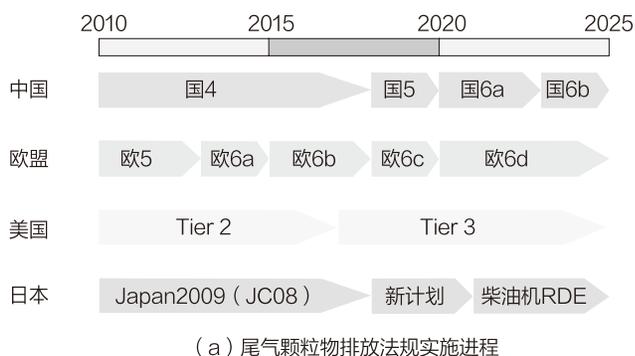


图1 轻型汽车尾气颗粒物排放法规的发展^[10,11]

分的界定、测试方法的确定以及颗粒物的收集上都存在一定难度，给法规的制定带来很大困难，造成了相关标准的缺失。随着全球汽车电动化趋势的加快，各国对于非尾气颗粒物排放问题的关注越来越高，相关法规的制定步伐正在逐步加快。美国早在1983年就开始研究评估制动磨损颗粒物，福特、通用等汽车公司在制动磨损颗粒物测试等方面已展开深入研究与开发；欧盟在2018年发布了制动测试循环（WLTC-novel），旨在建立一种通用的制动器磨损颗粒的取样和测量方法，预计明年发布相关标准；日本已经发布了乘用车制动磨损PM法规JASO C470—2020，并开发了乘用车轮胎粉尘排放测量方法^[12-15]。

2 尾气颗粒物排放及其控制

汽车碳达峰的过程也是产品结构升级的过程。虽然新能源汽车发展迅猛，但从保有量来看（图2），2020年占比仅1.75%。中国汽车工程学会2020年10月发布的《节能与新能源汽车技术路线图2.0》提出要到2035年，节能汽车与新能源汽车年销售量各占50%。因此，大量汽/柴油车产生的尾气颗粒物排放问题依然需要引起足够重视。

从近几年不同车型颗粒物排放分担率来看，国3、国4车型是当前颗粒物排放的主力军，颗粒物排放分担率2017年分别达到68.6%、17.2%^[16]，2018年分别达到68.7%、18.4%^[17]，2019年分别达到61.7%、20.6%^[18]。一方面，随着满足更高排放标准汽车比例的增加，低排放标准汽车的退出，汽车尾气颗粒物总体排放量会有所改观。另一方面，汽车保有量不断增加，而且随着车辆里程数的增加，单车尾气颗粒物排放因子会逐步增大^[19,20]，这就削弱了高排放标准汽车的减排作用。

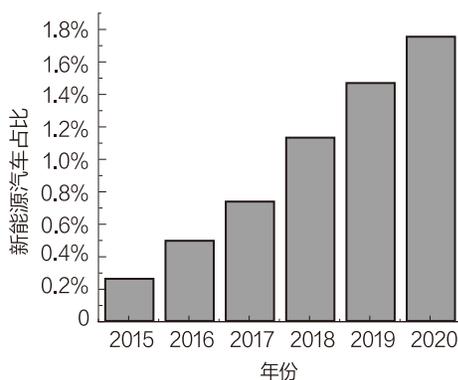


图2 我国新能源汽车保有量占比^[21]

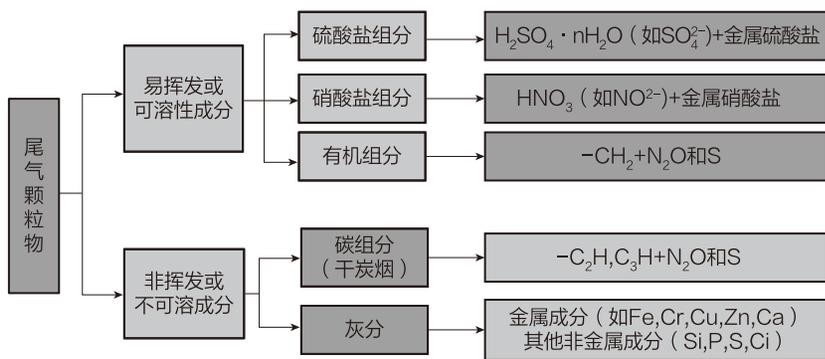
传统燃油车尾气颗粒物排放水平与燃油、润滑油、发动机运行工况、汽车行驶环境、排气后处理装置的应用相关联，其成分基本由硫酸盐、硝酸盐、有机组分、碳组分和灰分5部分组成（图3）。在碳组分即碳颗粒的表面上附着有金属及一些毒性物质，如多环芳烃类，能够引发癌症，导致基因突变。

随着涡轮增压、缸内直喷等先进发动机技术的应用，排气中颗粒物的粒径显著下降，其成分与形态等都发生了较大变化。粒径的变小及成分的变化加剧了对人类健康的危害。崔亮^[22]等的研究表明，国6汽车的颗粒物排放水平与国5汽车相比，虽然从 $(8.81 \pm 2.92) \text{ mg/km}$ 下降到了 $(1.51 \pm 0.35) \text{ mg/km}$ ，但其毒性却要高于国5汽车。

除了排气管中直接排入大气中的颗粒物（一次颗粒物）外，发动机工作过程中产生的 SO_2 、 NO_x 、可挥发性有机物（VOCs）等气态物质还会在大气中经稀释冷凝或与其他物质发生物理化学反应生成二次颗粒物^[23]。这些颗粒物一方面通过呼吸系统进入人体危害人类健康，另一方面还会通过降水淋洗或降水溶解等作用进入水环境中，危害水生生物^[22]。

2.1 柴油车颗粒物排放及控制

各类车型中，柴油车保有量占比虽然不高，2017



年、2018年、2019年分别为10%、9%、9%，却分担了近99%的颗粒物排放量^[16-18]，并且颗粒物排放数量也远超汽油车。在柴油车集中的商用车领域，我国2020年商用车销量中，新能源汽车占比仅为2.36%，纯电动汽车占比仅为2.26%。因此，碳达峰过程中应加强商用车领域的电动化，加速对柴油车的替代。

碳烟是柴油机排气颗粒物的主要组成部分，质量占比一般在50%~80%^[24]。在油气混合不均匀的情况下，燃油在高温缺氧环境中裂解生成不饱和碳氢化合物、聚合物和多环芳烃等前驱物，然后再经成核、表面生长、团聚等过程形成碳烟颗粒^[25,26]。通过提高燃油喷射压力促进形成更为均匀的混合气、优化燃烧室结构改善缸内气流运动促进充分燃烧，以及采用新型燃烧方式(HCCI、PCCI、LTC)等可以有效减少碳烟的产生。但单靠机内净化技术已不能达到法规要求，必须将燃油技术、机内净化技术与尾气后处理技术三个方面有机结合起来。

在排放法规不同实施阶段，综合考虑NO_x等各项污染物整体排放以及各地区之间的差异，与之对应的颗粒物处理技术路线也有所不同。进入国6标准实施阶段后，由于排放限值的进一步降低，尾气后处理装置的地位得到了进一步强化，氧化催化器(DOC)+颗粒物捕集器(DPF)+选择催化还原(SCR)成为主流技术路线，DPF则是控制颗粒物排放的关键因素。

DPF在结构形式上一般采用相间堵孔的壁流式蜂窝结构，材料基本选用堇青石、SiC和钛酸铝。DPF对颗粒物的去除效果较好，捕集效率能达到90%以上，但捕集后颗粒物的去除——DPF再生是实际运行过程中面临的巨大挑战。DPF再生可分为主动再生和被动再生两类。主动再生是指通过燃烧或逆向喷气等方式去除掉DPF中捕集到的颗粒物；被动再生是指在DPF上涂覆催化剂(CDPF)或在燃油中添加催化剂(FBC)，降低颗粒物起燃温度，利用发动机排气自身

条件氧化去除捕集到的颗粒物。相较于被动再生，主动再生对燃油的要求较低，再生效率高，应用较多；通常采取喷油助燃的形式来实现，即在DPF前布置一段DOC，通过在DOC前喷射柴油，经DOC氧化升温后，加热排气温度到颗粒物起燃温度(600℃左右)来再生DPF。DPF再生过程中，还有一部分颗粒物是不能够通过燃烧方式去除的，称为灰分，目前只能通过下线反吹形式

加以去除。灰分主要是由发动机润滑油产生，其成分大部分为含钙、镁、锌的硫酸盐、磷酸盐及氧化物等物质^[27]。为加大DPF储灰能力，提高系统耐久性，非对称结构的DPF—ACT是目前研究的热点(图4)。通过扩大DPF尾气进口通道面积来提高灰分的存储量，降低灰分对排气阻力的影响，提高DPF使用寿命。

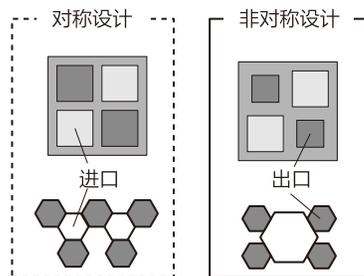


图4 非对称孔道DPF

2.2 汽油车尾气颗粒物排放及控制

由于排放量较低，汽油车尾气颗粒物直到国5阶段才有质量排放限值，国6阶段对汽油车尾气颗粒物排放限值也做出了明确规定(6.0×10¹¹个/km)。随着缸内直喷技术(Gasoline Direct Injection, GDI)的广泛应用，汽油车尾气颗粒物排放问题越来越受到重视。GDI汽车燃油直接喷入气缸，导致油气混合不均匀和燃油湿壁现象；缸内局部浓区的燃烧和附壁油膜的池火燃烧是碳烟产生的主要原因^[28]。

马超^[29]等对一辆国5 GDI汽车的尾气颗粒物排放数量进行了研究，发现其平均排放因子为2.098×10¹³~2.619×10¹³个/km，而测试中另一辆国4进气道喷射(Port Fuel Injection, PFI)汽车的平均排放因子为7.486×10¹¹~3.174×10¹²个/km。与柴油车类似，虽然通过优化燃油喷射策略与改善混合气组织方式等机内净化措施可以降低GDI汽车颗粒物排放，但要满足排放需求，燃油技术与后处理技术的

协同十分必要。因此,机动车环保信息公开的国6车型中加装颗粒物捕集器(Gasoline Particulate Filter, GPF)的汽油车占到了27%(截至2020年5月)^[30]。

3 非尾气颗粒物排放及其控制

汽车颗粒物排放中有一半以上来自非尾气排放^[31-34],制动器磨损、轮胎和路面磨损,以及车辆行驶再悬浮道路扬尘是其主要来源。随着汽车保有量的增加,由非尾气排放产生的颗粒物逐年增多。Zhang^[33]等估计中国每年由路面扬尘、轮胎与制动磨损产生的PM_{2.5}分别在8.1 Gg、2.5 Gg、0.8 Gg。经济合作与发展组织(OECD)2020年预测,2030年全球道路运输产生的非尾气PM_{2.5}排放量将比2017年增加约1.5倍^[35]。新能源汽车占比的增加并不能解决非尾气颗粒物排放问题,因此碳达峰过程中必须强化这一部分颗粒物控制。

与尾气单一位置排放不同,非尾气颗粒物排放来源较为广泛,排放水平受车辆状况、行驶速度、路面状况、地域特征、气象条件等多方面影响,实际计量难度较大。目前的研究主要集中在来源解析、成分分析、特性分析、扩散机理等方面。

3.1 制动磨损颗粒物

与尾气排放的颗粒物相比,制动磨损产生的颗粒物已经超过了国6b中I型试验颗粒物排放限值^[10]。城市环境中,由于车流密度大、制动频繁,制动过程中产生的PM₁₀质量占比在非尾气颗粒物排放中能达到55%以上^[36];综合高速公路等其他路况,非尾气颗粒物排放中,由制动磨损产生的颗粒物要高于轮胎磨损产生的颗粒物^[37-39]。

从质量分布上来看,制动磨损颗粒物中,PM_{2.5}占比近50%,PM₁₀占比近90%^[40-42];从数量分布上来看,大部分颗粒物都处在较小粒径范围内,但根据制动工况的不同,粒径数量分布有所差异^[40,43]。

汽车制动器制动过程是一个动能转化为热能的过程,受应力、摩擦、温度等多方面影响。制动盘与制动片摩擦过程中伴随着磨屑——制动颗粒物的产生,并经历循环变形、压碎、断裂、剥落等过程^[31]。磨损和颗粒形成通过撕裂摩擦元件摩擦层上宏观和微观不规则性的凸起而发生;颗粒物的产生主要来自黏着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损、疲劳磨损等形式^[44]。不同摩擦副材料之间形成的颗粒物在大小、成分及机理上有所不同。对制动颗粒物的控制主要包括两个方面:一是采用新材料或新工艺减少颗粒物的产生,如通过等离子电解镀铝(Plasma Electrolytic Aluminating,

PEA)工艺处理盘片表面,提高制动盘摩擦系数,降低制动片磨损率等^[31,45]。二是采用环境友好型摩擦材料,降低磨损颗粒物对环境的影响。制动片在20世纪80年代初期基本采用石棉型,但由于制动过程中产生的石棉纤维释放到大气中后,能长时间悬浮在大气当中,引发肺癌等疾病,因此从20世纪80年代中期开始,已经被世界各国逐步禁用。各类混杂纤维增强的无石棉摩擦材料开始逐步涌现,目前应用较多的主要有非石棉有机型(Non Asbestos Organic, NAO),低金属型(Low Metallic, LM)和半金属型(Semi-Metallic, SM)三类。因此,制动产生的颗粒物当中含有大量的Cu、Zn、Fe等金属元素,扩散至大气及水土当中后,严重威胁人类健康。综合来看,无铜陶瓷有机摩擦材料是当前各国研究的热点,可有效减少制动产生的颗粒物^[46,47]。

制动摩擦产生的颗粒物成分不仅与摩擦材料紧密关联,同时还与汽车重量、行驶速度、环境温度、驾驶风格等因素有关。汽车越重、制动初速度越大、环境温度越高,产生的颗粒物也越多。

3.2 轮胎与路面磨损颗粒物

汽车行驶中,轮胎与路面的摩擦会产生大量颗粒物,二者所占比重相当^[13]。这些颗粒物一方面悬浮在大气当中,直接危害人类健康;另一方面沉降于路面后,经雨水径流迁移,进入土壤、河流,最终汇入海洋。目前全球轮胎磨损颗粒的释放量在590万t/a左右,约占海洋微塑料总量的15%^[48]。

轮胎主要以橡胶为基底,以碳黑与二氧化硅作为填料,加入工艺油、金属编织网、硫化剂等添加剂制成,其表面主要元素为C与O,同时还有Si、Zn、Fe、Ca等其他元素^[43,48];与路面接触摩擦产生的颗粒物成分复杂,理化特性与分布规律等与轮胎特性、路面状况、气候特征、车辆特性、行驶状态密切相关。轮胎载荷越大、滚动速度越低,产生的颗粒物越多^[49,50]。刘金朋^[51]等的研究表明,轮胎磨损颗粒物的粒度和数量类似正态分布,粒度主要集中在100~300 μm,与文献^[13]所述较为吻合。

轮胎与路面磨损颗粒物以及制动磨损颗粒物都由摩擦副材料产生,可以通过改进材料降低部分颗粒物的产生。但对于轮胎而言,需要综合考虑耐磨性、抗湿滑性、滚动阻力等,而制动摩擦材料也需要综合考虑耐高温、低噪声、轻量化等因素,所以在平衡各因素的基础之上,还必须从其他方面入手加以控制。一方面,可以通过技术手段降低颗粒物在大气中扩散范

围,有效保护过往行人。轮胎与路面磨损颗粒物和制动颗粒物的产生集中在轮胎区域,在大气中的扩散特性有很多相似之处。宁波大学黄海波^[52-54]等对轮胎颗粒物在大气中的运动轨迹进行了相关研究,根据轮胎一轮罩结构,在轮胎正后方对应覆盖件上设计了颗粒物捕集进出口,从而降低颗粒物在大气中的扩散。另一方面,考虑颗粒物在路面与土壤的沉降以及径流迁移,可以通过路面清洁、吸附过滤等措施来削减颗粒物对环境的污染。

3.3 汽车行驶再悬浮道路扬尘

汽车行驶过程中会产生大量的道路扬尘。王凯^[55]等对2017年北京市延庆区不同等级道路扬尘研究表明,总悬浮颗粒物(TSP)、PM₁₀和PM_{2.5}的平均排放因子分别为16.95g/(km·辆)、3.25g/(km·辆)和0.78g/(km·辆)。

再悬浮扬尘颗粒物来源广泛,成分复杂,既有来自周围环境的颗粒物,又有车辆本身因尾气排放、制动与轮胎磨损等产生的颗粒物,同时还与气象条件等密切相关。因此,对于直接磨损排放与行驶再悬浮排放的区分难以界定;同时由于采样与分析方法的不同,再悬浮颗粒物在成分分析与粒径分布等方面会有所差异^[56]。

道路积尘负荷、车速、车流量、车重等是影响再悬浮扬尘颗粒物的主要因素^[57,58]。郭硕等的研究发现车辆行驶再悬浮PM_{2.5}浓度与车速变化不大,而PM₁₀起伏较大;因此,再悬浮颗粒物中较小粒径颗粒物的贡献率相比较较大粒径颗粒物要低一些^[59]。良好的行驶路面、较低的路面积尘负荷(通过清扫冲洗)、较低的车流量与较轻的车重都有利于减少行驶再悬浮颗粒物。

3.4 电动汽车与汽/柴油车的比较

虽然电池的存在使得电动汽车的重量较传统燃油车相比增加了25%左右^[60],由此加剧了轮胎的磨损,使电动汽车轮胎磨损颗粒物排放量较传统汽/柴油车增加了10%;但在另一方面,电动汽车制动系统能量回收装置却有效降低了制动磨损颗粒物的产生,与燃油车相比,降幅能达到40%^[61]。由于制动磨损颗粒物排放因子要高于轮胎及路面磨损颗粒物排放因子,综合上面两个方面因素,电动汽车在降低非尾气颗粒物排放方面同样具有积极的作用。

随着电动汽车续航里程的增加,在电池技术未取得一定进展的情况下,势必会引起电池重量的增加,从而加剧非尾气颗粒物排放。因此,电动汽车轻量化对于将来汽车颗粒物排放将起到重要作用。

4 颗粒物排放交通管理

Hicks^[62]等对英国伦敦马里波恩路新冠肺炎疫情管控前后的交通量进行了对比分析,发现管控期间32%的交通量减少带来了49%的PM₁₀减少量、76%的PM_{2.5}减少量和39%的制动颗粒物减少量。因此,从人、车、路多角度入手,加强交通管理是颗粒物控制的重要环节,主要包括以下三个途径:

一是优化交通结构。公路运输在我国交通运输结构中占主导地位,承担了约70%的旅客和货物运输^[63]。降低中长途公路汽车运输比例,增加短途公路运输中电动汽车的比例,将深入推进颗粒物减排工作。

二是降低交通拥堵。降低道路交通流量与拥堵是减少汽车颗粒物排放最为直接有效的方式。对于车流密集区域,如交通信号灯路口,车辆集中、车速缓慢、制动频繁、尾气排放严重,颗粒物集中涌现,可通过运用智能交通系统,分散汽车流量,降低拥堵程度,减轻这些重点区域及时段颗粒物排放。

三是鼓励绿色交通。各个国家和地区依旧致力于发展公共交通、倡导绿色出行。2019年底,我国城市公交车电动化比例已接近60%;又如英国伦敦在2019年4月设立了“超低排放区”,并在2021年10月扩大了这一区域。

5 总结与展望

碳达峰过程中汽车颗粒物排放的新特征强化了尾气颗粒物排放后处理技术的应用,同时也彰显了非尾气颗粒物排放控制的地位。从汽车生产制造,到使用管理,下一阶段颗粒物排放控制应着重加强以下几个方面的关注:

(1)法规层面。借鉴尾气颗粒物排放标准的制修订,从颗粒物收集、处理、分析等方面加快非尾气颗粒物排放标准的制订工作。

(2)技术层面。尾气颗粒物排放控制领域需要进一步加强对DPF与GPF再生过程的控制,提高可靠性、耐久性与经济性;非尾气颗粒物排放控制领域则应从摩擦材料研发、车身轻量化、能量回收等多方面出发共同应对。

(3)管理层面。加速通信、网络、大数据等先进技术智能网联汽车产业的融合,促进交通管理新提升。城市道路信号交叉路口生态进入和离开、路径引导、巡航控制等新技术的应用,定制公交、共享出行等新理念的发展,都能有效缓解交通拥堵,降低颗粒

物排放量, 平衡区域与时段之间的差异。

参考文献

- [1] 黄凡, 周家斌, 李红, 等. 武汉市夏冬季典型大气污染过程的成因与来源分析 [J]. 环境科学研究, 2020, 33(2): 280-288.
- [2] 刘艳菊, 杨峥, 刘庆阳, 等. 北京 4 个功能区春冬季大气重污染期间 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 化学污染特征及影响因素分析 [J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 631-646.
- [3] 王怡然, 袁自冰, 赵恺辉, 等. 粤港澳大湾区 PM_{2.5} 本地与非本地污染源解析 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1560-1574.
- [4] 张剑飞, 姜楠, 段时光, 等. 郑州市 PM_{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4813-4824.
- [5] 曹云擎, 王体健, 韩军彩, 等. “2+26” 城市一次污染过程 PM_{2.5} 化学组分和来源解析研究 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 361-372.
- [6] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [7] 常维, 刘斌, 祝月艳. 双碳目标下汽车产业发展趋势 [J]. 汽车纵横, 2021(8): 31-35.
- [8] 安锋, 康利平, 秦兰芝, 等. 中国传统燃油汽车退出时间表研究 [J]. 国际石油经济, 2019, 27(5): 1-8.
- [9] 柳青, 刘宇, 徐晋涛. 汽车尾气排放标准提高的经济影响与减排效果——基于可计算一般均衡 (CGE) 模型的分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2016, 52(3): 515-527.
- [10] 鲍晓峰, 吕猛, 朱仁成. 中国轻型汽车排放控制标准的进展 [J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(3): 213-225.
- [11] JOHNSON T, JOSHI A. Review of Vehicle Engine Efficiency and Emissions[R]. SAE Technical PaPer 2018-01-0329, 2018, DOI 10.427V2018-01-0329.
- [12] 钱国刚, 孙龙, 付铁强, 等. 轻型车制动磨损颗粒物排放与测试 [J]. 北京汽车, 2021(1): 15-20.
- [13] 陈东, 梁华军. 机动车辆制动摩擦粉尘对环境污染的研究综述 [J]. 润滑与密封, 2011, 36(5): 106-112, 115-115.
- [14] GUO D D, WEI H Y, GUO Y, et al. Non-exhaust particulate matter emission from vehicles: a review[J]. E3S web of conferences, 2021, 268: 01015.
- [15] 张子鹏, 张新峰, 刘振国. 轮胎磨损颗粒物排放特性研究现状综述 [J]. 时代汽车, 2020(12): 145-148.
- [16] 中华人民共和国生态环境部. 中国机动车环境管理年报 (2018 年) [R/OL]. [2019-04-09]. <http://www.gov.cn/guoqing/2019-04/09/5380744/files/88ce80585dfd49c3a7d51c007c0a5112.pdf>
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报 (2019 年) [R/OL]. [2019-09-04]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/201909/P020190905586230826402.pdf>.
- [18] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报 (2020 年) [R/OL]. [2020-08-10]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202008/P20200811521365906550.pdf>.
- [19] LIN Y C, LI Y C, AMESHO K T T, et al. Characterization and quantification of PM_{2.5} emissions and PAHs concentration in PM_{2.5} from the exhausts of diesel vehicles with various accumulated mileages[J]. Science of the total environment, 2019, 660: 188-198.
- [20] BOVEROUX F, CASSIERS S, DE MEYER P, et al. Impact of mileage on particle number emission factors for EURO5 and EURO6 diesel passenger cars[J]. Atmospheric environment, 2021, 244: 117975.
- [21] 上海艾瑞市场咨询有限公司. 中国新能源汽车行业白皮书 (2020 年) [R]. 2020: 57.
- [22] 崔亮, 倪红, 戴春蓓, 等. 国五国六汽车尾气颗粒物的生态毒性分析 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1483-1490.
- [23] 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.
- [24] 李亚松, 吕刚, 范晨阳, 等. 柴油机缸内团聚态颗粒氧化过程中的破碎 [J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(4): 332-339.
- [25] 张传桢. 柴油机排气过程中颗粒物理化特性的研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [26] 范晨阳. 柴油机燃烧过程中颗粒物的氧化和破碎行为的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [27] 张俊. 灰分对 DPF 性能影响机理及其相关应用问题研究 [D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [28] 帅石金, 董哲林, 郑荣, 等. 车用汽油机颗粒物生成机理及排放特性研究进展 [J]. 内燃机学报, 2016, 34(2): 105-116.
- [29] 马超, 张潇文, 李倩, 等. 轻型汽油车颗粒物数浓度排放特征研究 [J]. 环境污染与防治, 2020, 42(5): 547-552.
- [30] 王力辉, 耿培林, 刘乐, 等. 国六轻型车不同技术路线对排放油耗影响研究 [C]//2020 中国汽车工程学会年会暨展览会. 上海: 中国汽车工程学会, 2020: 827-832.
- [31] CAI R, ZHANG J Z, NIE X Y, et al. Wear mechanism evolution on brake discs for reduced wear and particulate emissions[J]. Wear, 2020, 452-453: 203283.
- [32] WAHLSTRÖM J. Special issue editorial: study of brake wear particle emissions[J]. Atmosphere, 2020, 11(12): 1359.
- [33] ZHANG J S, PENG J F, SONG C B, et al. Vehicular non-exhaust particulate emissions in Chinese megacities: source profiles, real-world emission factors, and inventories[J]. Environmental pollution, 2020, 266: 115268.
- [34] BEDDOWS D C S, HARRISON R M. PM₁₀ and PM_{2.5} emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles[J]. Atmospheric environment, 2021, 244: 117886.
- [35] VANHERLE K, LOPEZ-APARICIO S, GRYPHE H, et al. Transport Non-exhaust PM-Emissions. An Overview of Emission Estimates, Relevance, Trends and Policies[R]. ETC/ATNI. <https://www.researchgate.net/publication/351747101>, DOI10.13140/RG.2.2.25720.98562.
- [36] GRIGORATOS T, MARTINI G. Brake wear particle emissions: a review[J]. Environmental science and pollution research, 2015, 22(4): 2491-2504.
- [37] PRATICÒ F G, BRIANTE P G. Particulate matter from non-exhaust sources[C]//11th International Conference “Environmental Engineering” (ENVIRO). Vilnius, 2020. <https://doi.org/10.3846/enviro.2020.622>.
- [38] SINGH V, BISWALA, KESARKARA P, et al. High resolution vehicular PM₁₀ emissions over megacity Delhi: relative

- contributions of exhaust and non-exhaust sources[J]. *Science of the total environment*, 2020, 699: 134273.
- [39] AMATO F, SCHAAP M, RECHE C, et al. Road traffic: a major source of particulate matter in Europe[M]//VIANA M, ed. *Urban Air Quality in Europe*. Berlin: Springer, 2013: 165-193.
- [40] 刘笃优, 马尧, 门正宇, 等. 汽车制动磨损颗粒物排放特征与影响因素[J]. *汽车工程学报*, 2020, 10(5): 342-349.
- [41] GARG B D, CADLE S H, MULAWA P A, et al. Brake wear particulate matter emissions[J]. *Environmental science & technology*, 2000, 34(21): 4463-4469.
- [42] THORPE A, HARRISON R M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review[J]. *Science of the total environment*, 2008, 400(1-3): 270-282.
- [43] BEJI A, DEBOUDT K, KHARDI S, et al. Non-exhaust particle emissions under various driving conditions: implications for sustainable mobility[J]. *Transportation research part D: transport and environment*, 2020, 81: 102290.
- [44] VASILJEVIC S, GLIŠOVIĆ J, STOJANOVIC B, et al. The analysis of the influential parameters that cause particles formation during the braking process: a review[J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part J: journal of engineering tribology*, 2022, 236(1): 31-48.
- [45] CAI R, ZHANG J Z, TJONG J, et al. Wear performances of gray cast iron brake rotor with plasma electrolytic aluminating coating against different pads[C]//Brake Colloquium & Exhibition - 38th Annual. University of Windsor DOI 10.4271/2020-01-1623.
- [46] 江柯敏. 新型陶瓷有机摩擦材料及摩擦特性机理研究[D]. 宁波: 中国科学院大学(中国科学院宁波材料技术与工程研究所), 2018.
- [47] SINHA A, ISCHIA G, MENAPACE C, et al. Experimental characterization protocols for wear products from disc brake materials[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(10): 1102.
- [48] 焦萌, 曹秉帝, 张涛. 环境中的轮胎磨损颗粒: 从路面到海洋[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(12): 4263-4278.
- [49] 吴琳, 张新峰, 门正宇, 等. 机动车轮胎磨损颗粒物化学组分特征研究[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(4): 1486-1492.
- [50] BAENSCH-BALTRUSCHAT B, KOCHER B, STOCK F, et al. Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment[J]. *Science of the total environment*, 2020, 733: 137823.
- [51] 刘金朋, 黄海波, 李淑欣, 等. 轮胎磨损颗粒物形貌及产生机理的实验研究[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(5): 587-593.
- [52] 董家楠, 黄海波, 常向东, 等. 基于流体动力学的轮胎磨损颗粒物捕集通道位置研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2020, 33(4): 49-54.
- [53] 轩闪闪, 黄海波, 刘金朋, 等. 基于解析方法的轮胎磨损颗粒物运动轨迹分析[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(8): 1002-1007.
- [54] 卢轩, 黄海波, 张涛, 等. 汽车轮胎磨损颗粒物扩散特性的数值模拟研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2019, 32(1): 44-51.
- [55] 王凯, 樊守彬, 孙改红, 等. 北京市延庆区道路扬尘排放特征及影响因素[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(1): 1-7.
- [56] PISCITELLO A, BIANCO C, CASASSO A, et al. Non-exhaust traffic emissions: sources, characterization, and mitigation measures[J]. *Science of the total environment*, 2021, 766: 144440.
- [57] 李钢, 樊守彬, 钟连红, 等. 北京交通扬尘污染控制研究[J]. *城市管理与科技*, 2004, 6(4): 151-152, 158-158.
- [58] 姬亚芹, 温娟, 肖捷颖. 构建高时空分辨率排放清单应对道路交通扬尘污染——南开大学姬亚芹课题组成果[J]. *科技成果管理与研究*, 2018(1): 68-69.
- [59] 郭硕, 肖捷颖, 安塞, 等. 利用快速检测法研究石家庄道路交通扬尘排放特征[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(2): 206-210.
- [60] WAHLSTRÖM J, LEONARDI M, TU M H, et al. A study of the effect of brake pad scorching on tribology and airborne particle emissions[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(5): 488.
- [61] HOOFTMAN N, OLIVEIRA L, MESSAGIE M, et al. Environmental analysis of petrol, diesel and electric passenger cars in a belgian urban setting[J]. *Energies*, 2016, 9(2): 84.
- [62] HICKS W, BEEVERS S, TREMPER A H, et al. Quantification of non-exhaust particulate matter traffic emissions and the impact of COVID-19 lockdown at London marylebone road[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(2): 190.
- [63] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2021年)[R/OL]. [2021-09-01]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202109/t20210910_920787.shtml.

Particulate Emission and Control of Automobiles Under the Goal of Carbon Peak

LI Xin

(School of Mechatronics and Automation, Wuchang Shouyi University, Wuhan 430064, China)

Abstract: The determination of the carbon peak goal of the automotive industry has accelerated the pace of automotive electrification transformation. With the increase of electric vehicles year by year, more and more attention has been paid to the non-exhaust emission particulate produced by brake wear, tire and road wear, road dust and so on. Automotive exhaust particulate is mainly produced by combustion, and its location and form are relatively single. The non-exhaust particulate is mainly produced by the friction of friction pair, with dispersed position and complex composition. Although electric vehicles have developed rapidly in recent years, and the exhaust emission control over the years has made the exhaust particulate matter emission at a low level, the ownership of traditional fuel vehicles still has an absolute advantage. While highlighting and accelerating the control of non-exhaust particulate emission, the exhaust particulate still needs to be paid enough attention. On the basis of continuing the experience of exhaust emission control, further consider comprehensively from the three aspects of policies and regulations, engineering technology and traffic management should be taken, coordinate control from multiple perspectives, and strengthen the control of vehicle particulate matter emissions.

Keywords: particulate; automobile; non-exhaust emission; carbon peak