

直喷式汽油机微粒排放规律与控制策略的研究进展

朱小慧^①, 钱勇^②, 吕兴才^{②*}

① 泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201201;

② 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

* 联系人, E-mail: lyxc@sjtu.edu.cn

2015-04-13 收稿, 2015-05-27 修回, 2015-05-28 接受, 2015-07-01 网络版发表

国家杰出青年科学基金(51425602)资助

摘要 直喷式汽油机因较高的热效率而得到广泛的应用, 然而它存在微粒排放较高的缺点. 由于碳烟微粒的潜在致癌性, 国际上开始将直喷式汽油机的微粒排放质量和数量列入新的排放法规进行限制. 针对这一问题, 国际上开展了大量的探索性研究. 结果发现, 直喷式汽油机的微粒排放主要来源于活塞顶面、气缸壁面、气门底面等处附着的燃油发生非预混合燃烧以及混合气分层燃烧. 因而汽油机的混合气制备方式、燃油喷射参数、燃料物理化学特性、环境条件、运行工况参数等对微粒排放质量和微粒数量有显著影响. 此外, 乘用车排放测试是在底盘测功机上运行不同的工况循环, 各种法规的工况条件不同, 因而同一台汽车也会得到不同的排放测试结果. 本文针对国际上的最新研究, 系统总结了直喷式汽油机微粒生成路径、微粒生成影响因素与控制策略、汽油醇微粒排放特点、工况循环对微粒排放影响等几个方面的最新进展, 并对今后的研究方向进行了展望.

关键词 直喷式汽油机, 微粒质量, 微粒数量, 影响因素, 控制策略

自20世纪90年代中后期开始, 缸内直喷(GDI)汽油机因显著的充量冷却效果、更高的压缩比、较低的泵气损失而比同排量进气道喷射发动机(PFI)功率输出更大、热效率更高、燃油消耗率更低, 故而被大规模装备到乘用车上. 但由于燃料是在进气行程或压缩行程才被直接喷射到燃烧室, 蒸发雾化时间相对PFI发动机大幅度缩短, 故而存在燃料不完全蒸发而导致的混合气不均匀问题. 此外, 燃油喷射过程中可能发生油束撞击活塞顶、气缸套而使得部分燃料黏附在这些壁面. 壁面黏附的燃油和局部富燃区域使得缸内存在非预混合燃烧, 导致直喷汽油机具有较高的微粒(PM)排放.

内燃机排出的微粒是碳氢燃料不完全氧化与燃烧的产物. 大部分颗粒在燃烧过程中进一步氧化成各种中间物质和二氧化碳, 而剩余部分则随着排气

以固体颗粒积聚物的形式排出. 根据微粒直径的大小可以将其分为超细微粒(小于100 nm)和纳米微粒(小于50 nm). 此外, 也被Kittelson^[1]分为核模态和积聚模态颗粒. 一般而言直径小于50 nm的微粒称为核模态, 通常是激冷或稀释过程中有机成分气-固转化生成; 直径在50~1000 nm的微粒称为积聚态, 主要是富燃区域燃烧过程产生的碳质聚合物.

日益严格的排放法规使得PM排放受到极大的关注^[2-5]. 现代GDI发动机很难满足未来的排放限值, 除非经过优化显著降低微粒排放. 可行的手段一方面是采用后处理装置如汽油机微粒过滤器(GPF)来解决; 另一方面则是减少缸内微粒排放, 重点是减少扩散燃烧、优化喷射系统的参数——包括优化喷射正时、提高喷射压力、多次喷射策略. 此外, 燃料也是一个至关重要的因素^[6].

引用格式: 朱小慧, 钱勇, 吕兴才. 直喷式汽油机微粒排放规律与控制策略的研究进展. 科学通报, 2016, 61: 102-112

Zhu X H, Qian Y, Lü X C. Recent progress in particle matter emissions and control strategies of gasoline direct injection engines (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 102-112, doi: 10.1360/N972015-00381

目前,碳烟测量发动机微粒排放的仪器主要有英国Cambustion公司的DMS500、Dekati公司的ELPI、TSI公司的TSC/CPC、以及AVL公司的PASS等设备.不同仪器的测量特点不同,如DMS500和ELPI主要是测量瞬态粒径谱,而TSC/CPC主要用于稳态测量,但是各种仪器测量结果大体吻合,且PM质量结果比微粒数量浓度更吻合^[7].

由于汽油机碳烟微粒生成机理的复杂性、影响因素的多样性、试验过程的难于重复性,深入理解碳烟微粒的基本特征,包括其本质、结构、形态形貌、粒径分布规律,揭示各种因素对其生成和氧化机理的影响,掌握发动机形式、燃料特性、喷射系统参数的影响规律至关重要.近年来,世界各国研究人员相继开展了大量的试验研究,本文将从汽油机碳烟微粒的生成机理、GDI汽油机微粒的影响规律和控制策略、醇类添加对微粒排放的影响、整车工况循环对微粒排放的影响等几个方面对相关工作进行总结,同时指出汽油机微粒排放研究尚待解决的一些重要科学问题.

1 汽油机碳烟微粒的生成途径

碳烟主要形成于未燃燃料.核模态颗粒主要成由于较高压力下富燃区域的气相到固相的转化,其成分大致是C8:1H,新生颗粒包含的H比例较高,C/H甚至可以到1:1^[8].碳烟生成包含一系列复杂的化学反应和物理演化过程.到目前为止,液态或者气态碳氢燃料生成颗粒物通常包括6个可以区分的过程,如图1所示^[9].过程分别如下所述.(1)热解,富燃、高温作用下燃料发生裂解生成碳烟或者气相前驱物.燃料裂解的速度决定了碳烟生成速度,而燃料裂解产物的多样性对碳烟形成也起到决定性作用.(2)成核,这一过程涉及有机气相前驱物生成小的粒子.(3)聚合,是指两个粒子发生碰撞并黏附在一起形成大颗粒,表面积也不断长大.一旦这一过程发生,就可以首次识别到直径大约为2 nm的微粒.(4)凝并,是发生在温度低于饱和蒸汽压所对应的值时引起蒸汽凝

结成颗粒.(5)吸附,是指在化学作用或者物理作用下黏附在某一表面上.(6)氧化,是指在高温作用下碳烟微粒及其中间物质在生成过程中发生的氧化过程.

在上述过程中燃料热解以及多环芳烃的生成过程最为重要,也是迄今为止尚存在很多争议的地方.一般认为碳烟成核的前驱物主要有聚乙炔、 $C_3H_3^+$ 等离子、或者多环芳烃(PAHs).其中多环芳烃是碳烟生成的前驱物,已经得到广泛的认可,并被许多实验研究和模型研究所证实.在多环芳烃的生成过程中,第一个苯环的生成起着关键作用,而且被认为是碳烟生成的速率控制步,其生成路径包括偶数碳原子路径、奇数碳原子路径、和炔丙基加成路径^[10,11].而多环芳烃的生成过程中,到目前为止也有人提出了很多机理,包括脱氢加乙炔理论(HACA)^[12]、五元环(环戊二烯基)加成方法^[13]、甲基/苯基加成法(MAC/PAC机理)等^[14,15].

根据大量的文献报道,汽油机的PM生成主要是由于充量不均匀引起的局部富燃区域的存在,以及部分没有完全蒸发的燃油液滴发生扩散燃烧.缸内直喷式汽油机是在发动机进气-压缩行程将燃料直接喷射到燃烧室.根据喷射时刻不同有均质和分层两种形式;根据油束在燃烧室的运动形式和火花塞附近混合气形成方式可以分为喷雾引导、壁面引导、软喷射3种方式.尽管汽油黏度很小,但是由于喷射压力不高、混合气形成时间较短,加之汽油中高馏分的存在,因此在着火前不可能所有燃料都完全蒸发气化并形成均质混合气.其次,无论是哪种喷射方式,在高速气流的作用下,不可避免地有部分燃料直接或者间接黏附在气缸壁面、缸盖底面、活塞顶面等区域,形成附壁油膜.由于这些壁面的温度较低,蒸发速率很慢,且蒸发的燃料不能与空气有效混合,最终导致局部区域发生扩散燃烧(非预混合燃烧),产生较高的微粒排放.对于PFI汽油机,进气门上黏附的燃油液滴成为相对重要的因素,也即是说靠近气门处的液体燃料扩散燃烧是PM生成的主要原因.一般而言,缸内直喷汽油机无论是质量排放还是数量浓度都要比PFI汽油机高得多.

Ketterer和Cheng^[16]对一台缸内直喷汽油机在不同喷射时刻下的微粒排放进行研究,发现无论是在进气行程喷射还是压缩行程喷油,只要油束撞击活塞顶面就会造成较高的PM排放,如图2所示.当喷射发生在压缩冲程初期,由于燃油充分蒸发,很少有附

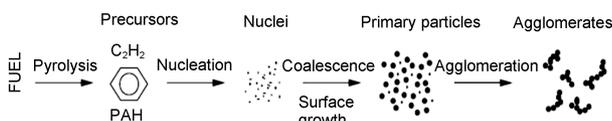


图1 碳烟微粒的生成机理^[9]

Figure 1 Soot formation phases^[9]

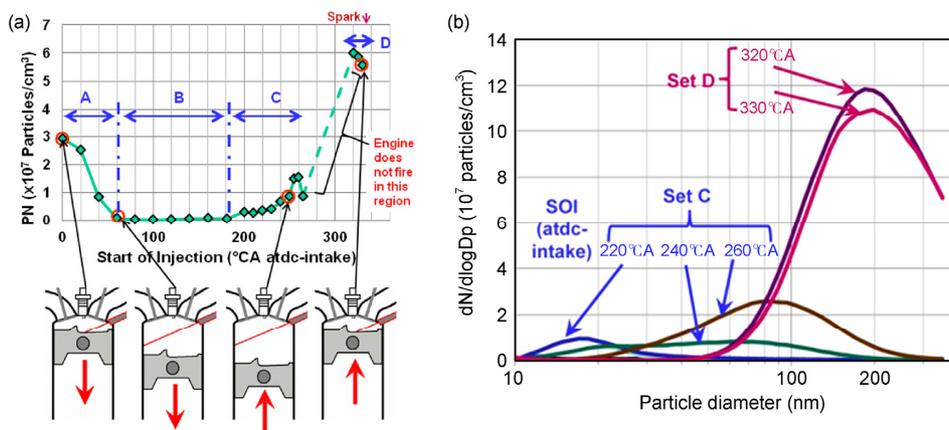


图2 (网络版彩色)油束撞击活塞顶面对PM排放的影响^[16]。(a) 微粒数目与喷射时刻的关系; (b) 微粒浓度-粒径分布规律
Figure 2 (Color online) Effect of fuel injection timing on PM emissions^[16]. (a) PN as a function of SOI; (b) particle size spectra for different SOI

壁油膜, 故微粒数量(PN)非常少且粒径很小. 当推迟喷射时刻, 蒸发和混合时间缩短, 形成壁面油膜, 粒子数目和直径增加. 当喷射非常接近点火时刻时, 在活塞上有明显油膜, 导致粒子数很高、直径较大. 值得注意的是, 图中所示的进气行程后期和压缩行程早期, 如果缸径较小、喷射压力很高、油束贯穿度很大, 则会发生燃油沉积在缸壁上, PM排放肯定会显著增加.

2 微粒排放影响因素与控制策略

汽油机的微粒排放与燃料的物理化学特性、充量成分、燃料喷射策略、燃空混合过程、全行程范围内的着火与燃烧、后处理策略等很多因素密切相关, 甚至环境温度和压力、冷却水温度、大气湿度等也有非常重要的影响. 如上所见, 进气道喷射发动机的微粒质量排放和数量浓度都显著低于直喷式发动机. 为此本节针对直喷式发动机, 从燃料特性、运行参数、混合气制备方式等方面总结微粒排放的影响规律, 并讨论如何通过整机的优化实现微粒质量排放和数量浓度的有效降低.

2.1 燃料理化特性的影响

众所周知, PM排放随着燃油品质而变化. 一般认为, 扩散燃烧是碳烟生成的根本原因, 这就与燃料特性有很大的直接相关性. 汽油机的扩散燃烧主要是黏附在活塞顶和气缸壁面的燃料燃烧所致, 他们因几乎没有蒸发和汽化而以液态形式燃烧. 因此, 汽油机的PM排放与燃料的难挥发成分有很大的关系,

此外也与燃料分子结构有关, 比如说芳烃成分易于生成碳烟. 也就是说, 燃料物理化学特性包括黏度和沸点、馏程曲线、饱和蒸汽压、表面张力、分子结构与成分(碳链长度、分支化程度、饱和度、双键个数、环数等)、C/H/O比例有非常重要的影响.

基于此, Aikaw等人^[17]在标准汽油中添加不同结构的化学物质如三甲基戊烯、十二烷、己基苯、1,2,4三甲基苯、乙醇等构建具有不同物理化学特性的测试燃料, 并测试了美国、欧洲、中国、日本商业汽油, 进而探索PFI汽油机的燃料特性与微粒排放的关系. 研究表明具有较高沸点的芳烃成分以及较多双键个数的燃料会产生较高的碳烟粒子数目, 但是高沸点的饱和成分(较少的双键个数)如烷烃对PN影响较小. 经过进一步仔细分析, 证实了低饱和蒸汽压与高PN排放有紧密的关系. 通过对燃油中的质量成分、蒸汽压、等效双键个数进行分析, 提出了PM指数的概念, 用来预测各种燃料的PN趋势和PM质量. 其中PM指数定义如下:

$$PM\ Index = \sum_{k=1}^n I_k = \sum_{k=1}^n \left(\frac{DBE_k + 1}{VP_{[443K]k}} \times W_{ik} \right),$$

其中, DBE是等效双键个数, VP是饱和蒸汽压, W_{ik} 为每种物质的比例.

此后, Aikaw和Jetter^[18]进一步证实PM指数也适用于GDI汽油机, 并且发现在FTP-75循环下直喷式汽油机的微粒数量浓度与PM指数有极大的相关性, 如图3所示. 对多个国家和地区汽油样品进行了详细的谱分析, 计算了其PM指数, 发现具有较高PM指数的汽油可以产生10倍于较低PM指数的微粒排放. 这说

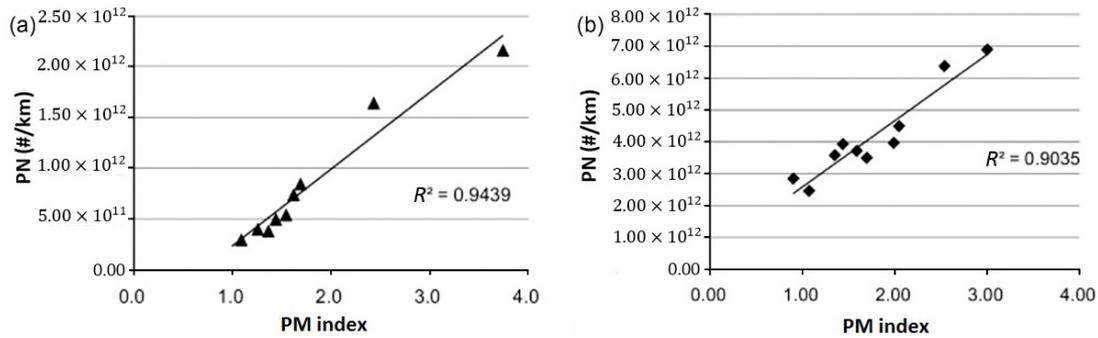


图3 GDI和PFI汽油机微粒数量与PM指数的关系^[18]. (a) PFI汽油机; (b) GDI汽油机

Figure 3 Relationship between PM mass and PM index for GDI and PFI engines^[18]. (a) PFI engines; (b) GDI engines

明PM排放的改善不仅需要依赖于发动机硬件的改进,同时需要燃油品质的改善.上述PM指数建立了微粒排放与燃料蒸汽压和双键个数之间的关系,但是无法独立地控制两个因素. Leach等人^[19]在一台喷雾引导单缸光学发动机上根据Raoult's定律和通用官能团反应活性系数法(Universal Functional Activity Coefficient Method)来设计燃料参数,使得蒸汽压力和双键个数两个变量独立可控,进而提出了PN指数的概念.发现微粒排放随着PN指数的增加而增加,但是不是线性关系.在相同的双键个数下微粒数量排放随着饱和蒸汽压的升高快速增加.

需要注意的是,前面所提出的PM指数和PN指数都没有包含分子成分的影响.事实上,根据前面所述汽油机微粒生成的主要渠道是没有完全蒸发混合的燃料发生非预混合燃烧,因此如果燃料分子自携氧可以改善局部微观区域的燃烧,将有利于抑制碳烟微粒的生成.为此,Oh和Cha^[20]分别对中置外开直喷、侧置多孔直喷、PFI汽油机的燃料氧含量对PM排放的影响进行实验,添加甲基叔丁基醚(MTBE)来调节燃料中氧含量,发现汽油中的氧含量增加有利于降低GDI发动机的PM排放,特别是启动阶段的降低量非常显著.尽管MTBE增加使得辛烷值增加,但是PM的减少很显然不是由于辛烷值的关系,这主要是因为氧分子使得碳氢燃料完全燃烧所致,因为没有其他的重要物理特性改变. Wang等人^[21]在单缸喷雾引导GDI汽油机上在平均指示压力(IMEP)3.5~8.5 bar范围内比较了计量比下汽油和乙醇的PM排放,发现燃用乙醇会产生较少的微粒质量,但是PN浓度却大幅度增加;喷射系统对PM和PN有较大的影响,高的喷射压力和较为清洁的喷嘴产生较低的PN和PM排放.然而燃用乙醇时对喷射条件不是太敏感,这主要是

由于其较高的挥发性和扩散火焰较低的碳烟生成趋势.

Wang等人^[22]进一步采用热重研究了单缸喷雾引导GDI汽油机燃用汽油、乙醇、E25(25%乙醇汽油)、DMF(二甲基咪唑)时的PM成分和氧化速率.发现在IMEP 8.5 bar(1 bar=0.1 MPa,下同)的情况下,燃用汽油、E25、DMF的PM排放中绝大部分是挥发分,而元素碳大约为35%;但是燃用乙醇时元素碳只占6.3%. Vuk和Griend^[23]在直喷汽油机上研究不同比例的乙醇/汽油的微粒排放特性,考察乙醇比例、溜程、芳烃含量的影响.由于乙醇含氧、燃油碰壁导致的湿壁燃油可以快速蒸发和气化,即使添加10%的乙醇也可以明显降低微粒质量排放和数量排放.如果将乙醇比例增加到30%或者85%,由于芳烃成分的显著减少,将成为微粒排放的清洁燃料.

2.2 运行参数的影响

(i) 负荷与当量比. Bonatesta等人^[24]发现即使发动机在进气行程喷油而运行计量比均质点燃模式,在低速大负荷工况下因较高的成核速率使得发动机碳烟质量排放较高;而发动机运行上边界附近时,由于喷雾碰壁问题导致较高的PM排放. Pei等人^[25]发现在浓混合气下,微粒数量浓度对AFR相当敏感,并随空燃比(AFR)增加迅速减小,如稀薄燃烧相对浓混合气可以减少90%的微粒数量;此外,研究发现稀混合气和浓混合气的微粒数量-粒径分布规律明显不同:浓混合气下有双峰-核模态和积聚模态,稀薄混合气下只有核模态.

(ii) 燃油喷射系统参数. 燃油喷射系统的主要参数,包括喷射压力、喷孔直径、喷射时刻、喷射持续时间等对发动机颗粒排放有至关重要的影响. 较

高的喷射压力会使得燃油喷射初始速度大、喷射持续时间短、液滴直径小,从而使得喷雾充分分布于整个燃烧室,提高了混合速率和空气利用率.在部分负荷下,微粒排放对喷射正时非常敏感,较高的喷射压力会明显减少积聚态颗粒质量^[26].He等人^[27]研究了壁面引导汽油机(WGDI)的微粒特性,发现高喷射压力会减少微粒数目;而喷射压力从100 bar升高到200 bar后,PN数目会减少70%;当采用300 bar的喷射压力,PN数目会进一步减少50%.一般来说,较早的喷射时刻使得混合气形成时间拉长,混合气更加均匀,有助于减少微粒排放^[25].

(iii) 废气再循环. Hedge等人^[28]在小型增压GDI汽油机上研究了稳态工况下不同EGR率的碳烟微粒粒径和质量分布.从总体上看,冷却EGR能有效降低微粒的质量;内部EGR相对外部冷却EGR能够更加有效减少小负荷下的干碳烟(soot)和固体颗粒物.此外,EGR会增加排气中的可溶性颗粒,主要是过热废气的稀释和冷却所致. Pei等人^[25]也证实EGR可以有效减少积聚模态微粒,但是会增加核模态的颗粒数.

(iv) 冷起动. 冷起动是汽油机微粒排放的主要贡献者^[29]. Whelan等人^[30]在一台壁面引导直列4缸涡轮增压中冷汽油机上的研究发现三元催化转化器(TWC)可以减少冷起动阶段65%的PN数目,特别是在23 nm以下的微粒减少了95%以上,但是会引起50 nm以上的颗粒浓度明显增加. Ketterer和Cheng^[16]对典型的冷态高怠速工况下(1200 r/min, IMEP为2 bar)的微粒排放进行了研究,测量了微粒直径在22~365 nm范围内的PN数目,发现在进气行程中间喷射汽油由于进气气流运动的强烈湍动能作用可以实现快速蒸发和混合而具有非常低的PN浓度,此时避免了燃料在活塞顶和气缸壁面形成油膜.

(v) 环境温度. Chan等人^[31]对不同环境温度下(-18~+22)的气体排放和微粒排放研究,发现无论是GDI还是PFI,也无论是汽油还是乙醇汽油,环境温度的降低都会导致PM排放的增加,特别是GDI发动机微粒增加明显.但是Magara-Gomez等人^[32]发现微粒排放在环境温度18~30 内变化不大. Bielaczyc等人^[33]在BOSMAL's气候/环境可控实验室对一批满足欧5排放的汽车测试了更宽环境温度范围(-35~+60)内的微粒粒径分布,结果也证实粒径分布曲线对环境温度和发动机热状态都非常敏感,特别是

微粒质量和数量浓度随着温度从+25~-7 变化将显著增加,且粒径分布规律也受到环境温度的适度影响.

2.3 燃料喷射方式的影响

发动机混合气制备方式影响巨大.研究表明壁面引导发动机和喷雾引导发动机(SGDI)的微粒生成规律显著不同. Andersson等人^[34]发现WGDI排出的微粒中元素碳占总质量的72%左右,与柴油机类似; Price等人^[29]发现SGDI的微粒主要成分是挥发分,元素碳仅2%~29%左右.产生这一差别的主要原因在于两种混合气制备方式有所不同:与壁面引导方式不同,喷雾引导发动机的喷嘴接近火花塞,较少发生壁面燃油碰撞,因此其燃烧过程扩散燃烧比例非常少.

Zhang和McMahan^[35]对进气道喷射、壁面引导直喷、喷雾引导直喷几种发动机的比较发现:对于WGDI发动机积聚态固体颗粒物在整个FTP循环的冷起动阶段内占据主导位置,峰值浓度与喷雾引导发动机处于一个数量级;在FTP循环的其他阶段,SGDI发动机的微粒数量浓度比WGDI低90%;对于WGDI发动机,在整个FTP循环内微粒数量浓度与直径分布都呈现双模态分布,且集聚模态峰值明显高于核模态峰值浓度;对于PFI发动机,只有在冷启动阶段有明显的集聚模态峰值.

由于进气道喷射发动机的超低微粒排放, Daniel等人^[36]研究了双喷射模式(PFI+GDI)策略来降低微粒排放.这一方式可以使两种燃料在缸内以任意比例混合,并根据发动机转速负荷以及燃料特性实时调控.与直喷相比,双喷射模式的平均PM直径减小,且积聚态的PM几乎可以忽略.

2.4 直喷式汽油机微粒控制途径

汽油机的微粒排放控制需要从两个方面来着手:首先是抑制或者减少缸内碳烟微粒的生成,其次利用后处理装置进一步过滤碳烟微粒,最终使得尾气排出的碳烟微粒满足相关标准.而这两条途径中,首当其冲的就是控制缸内碳烟微粒的生成量.在缸内微粒的生成方面,主要包括如下内容.

(i) 进气控制. 如提高充量系数、合适的进气温度、优化进气排气门正时和气门重叠角、缸内新鲜充量和残余废气的充分混合.

(ii) 燃油喷射. 避免喷雾湿壁、减小液滴平均直径、合适的喷雾形态、较高的喷油压力、合适的喷

射时刻、提高燃油温度、多次喷射、优化空燃比控制技术. 通过对喷射系统的优化可以显著减少整个发动机的微粒质量排放和微粒数量浓度. Piock等人^[37]认为蒸发速率和贯穿度是影响微粒生成的主要因素, 因此需要优化喷射时刻和喷射次数等重要参数, 特别是在冷启动和催化剂预热阶段的燃油喷射参数. Whitaker等人^[38]提出通过燃烧系统的改进和控制策略的优化来大幅度降低缸内直喷增压汽油机的PM排放, 探讨了燃油与燃烧室的交互作用对微粒形成的影响, 发现多次喷射策略可以显著减少微粒的生成. 需要注意的是, 大量研究表明通过喷射参数的优化, 满足PM质量排放问题不大, 但是PN方面仍然存在一定的挑战.

(iii) 燃烧过程控制. 优化气流运动、油气充分混合、避免局部富燃区域、提高充量温度、推迟点火等.

(iv) 发动机基本运行策略. 确保燃烧室壁面快速预热、减少燃烧室油膜附壁、避免曲轴箱润滑油和燃油沉积在气道而进入气缸. Whitaker等人^[38]发现发动机各个部件的温度对PM有明显影响, 特别是活塞温度快速升高将有利于抑制PM排放. 由于汽油机微粒主源于冷启动、冷态过渡、催化剂预热、热机过渡等阶段, 作者认为通过硬件和系统的优化, 可以分别对各个阶段的微粒降低10%, 60%, 10%和20%. Kim等人^[39]确认催化剂预热阶段和加速阶段是PM生成的主要渠道, 因此要特别关注这两个阶段的发动机基本参数、运行策略、喷油三者之间的耦合优化. Fatouraie等人^[40]也认为较高的冷却液温度可以减少活塞顶和气缸壁面的液态燃油质量, 从而减少缸内微粒的生成.

在后处理方面, 可以采用的装置是汽油微粒过滤器. Chan等人^[31]发现GPF在低温下的微粒质量去除效率在62%~92%之间, 而数量浓度在各个温度环境下去除效率约80%~85%. 但是如果运行US06循环, GPF在微粒质量和数量浓度的去除方面都要低一些. 值得注意的是, 目前的三元催化转化器对微粒过滤也有明显的影响. Chen等人^[41]发现TWC在很大程度上能减少核模态颗粒但是积聚模态却影响不大, 由此影响微粒数量, 但是对微粒质量排放影响不大. 帅石金等人^[42]对催化转化器前后的微粒特性研究发现TWC后的SOF和核态微粒数量明显降低, 负荷、过量空气系数和点火提前角等参数和TWC对微粒粒径范围的影响小.

3 汽油醇对微粒生成的影响

乙醇很早就作为抗爆添加剂或者替代燃料用于汽油机. 目前, 乙醇汽油已经在巴西、美国、中国等国家和地区得到广泛应用. 汽油添加乙醇对气态排放物的影响已经进行了广泛的研究, 但是对微粒排放的影响尚未得到足够的重视. 因此, 在最近几年里, 针对醇-汽油混合燃料的微粒排放规律做了初步探索^[43,44].

低沸点含氧燃料的物理化学性质改变了混合燃料特性, 如密度、黏度、热容量、溜程曲线等, 这些燃料特性影响喷射特性、混合气形成、微观区域燃烧、平均燃烧温度, 从而可能影响到微粒生成速率. 需要注意的是, 乙醇分子内氧原子的存在与未燃液滴中氧分子的存在是严格不同的, 对颗粒物质的生成影响效果也不相同^[45]. 乙醇添加对燃料的挥发性影响比较复杂, 尽管由于乙醇的饱和蒸汽压(VRP)较低, 但是加入到汽油中最开始会使得混合燃料的VRP上升, 特别是10%的乙醇汽油VRP比汽油高.

到目前为止, 汽油中添加乙醇到底是引起颗粒排放的增加还是减少尚无定论. 很多研究表明添加乙醇对排气微粒的质量排放有适度影响, 而PN数目和粒径分布规律则较为敏感, 即受汽油中乙醇比例影响较为复杂^[46]. Chen等人^[47]在SGDI汽油机上研究了乙醇/汽油混合燃料在冷态(20)和热机(80)下的微粒排放特性, 发现在计量比混合气下乙醇汽油的微粒质量和微粒数量浓度显著增加, 当采用E70和E80时增加幅度达到8~11倍. 然而在浓混合气下, 即使采用E10也可以使微粒质量排放相对汽油降低一个数量级, PN则降低两个数量级. 通过分析发现计量比混合气下的颗粒增加主要归结于几个方面: 其一, 乙醇添加使得喷射持续时间和燃烧持续期增加; 其二, 由于乙醇气化潜热是汽油的3倍左右, 使得乙醇汽油难于蒸发汽化且蒸发吸热量增加, 导致混合气不均匀度增加; 其三, 添加乙醇后燃烧速率减慢、循环变动增加. Chen和Stone^[48]对不同比例的乙醇/异辛烷混合燃料的蒸发焓研究发现, 较高的蒸发焓明显增加充量冷却效果, 且发现较高的蒸发焓对GDI发动机的微粒排放有负面影响.

Price等人^[49]在喷雾引导发动机的实验表明浓混合气下随着含氧量增加积聚模态数量浓度和平均直径减小, 但是核模态数量浓度增加; 对计量比混合气, E85的微粒数量浓度显著低于其他燃料, 而汽油、30%乙

醇汽油、30%甲醇汽油相当;85%乙醇汽油的PM受空燃比的影响不显著,积聚态数量浓度非常低,特别是在浓混合气工况下。从这些结论可以推测燃料分子含氧可以减少生成碳烟前驱物的中间物质浓度。

Storey等人^[50]在一台GDI汽车上比较了E0, E10, E20的微粒质量和微粒数量浓度,发现添加乙醇可以同时减少瞬态阶段和过渡阶段的PM质量和数量浓度,这主要归结于富燃情况下的PM降低。Dimou等人^[51]在缸内直喷发动机上测试了E0, E10, E25, E50, E85在冷却水温度为0~40 °C下的PM排放。在冷却水温度低于20 °C时,汽油的微粒数量排放显著高于乙醇汽油;但是在20 °C以上,各种燃料的PN数目(15~350 nm)差别不大。Vuk和Griend^[23]也认为乙醇含氧、燃油碰壁导致的湿壁燃油可以快速蒸发和汽化,即使添加10%的乙醇也可以明显降低微粒质量排放和数量排放。

Di Iorio等人^[52]在一台增压GDI汽油机上研究了乙醇汽油(E0, E50, E85, E100)分别在均质充量和分层充量下的PM排放。发现乙醇排出更多小粒径的颗粒,但是总的微粒质量减少;使用E50和E85燃料,集聚态颗粒数量增加明显;特别是E50燃料如果采用分层模式将导致微粒质量排放大幅度增加。喷射策略对缸内微粒生成有重要的影响,当燃料在进气行程初期开始喷油,足够的时间来蒸发并与新鲜充量进行混合,从而形成均质混合气。如果在进气行程后期喷油,尽管此时缸内温度较高利于蒸发,但是蒸发与混合的时间太短,从而产生一定程度的分层和不均匀混合气。

Karavalakis等人^[53]在PFI和GDI汽油机上比较了不同比例的乙醇-汽油和丁醇-汽油混合燃料的常规排放、超细颗粒、炭黑排放。发现PFI汽车的微粒质量排放和PN数目显著低于缸内直喷汽车;较高含氧量可显著降低直喷发动机的PM排放,但是在中等含氧量下却不一定。对于碳烟微粒数目而言,总体上随着乙醇和丁醇比例的增加而减少,但是存在很多不确定性。

李翔等人^[54]对甲醇/汽油混合燃料在直喷式汽油机上的微粒特性研究发现,在发动机典型常用运行工况下,燃用纯甲醇燃料(M100)时,缸内直喷汽油机几乎不产生微粒排放;燃用甲醇/汽油混合燃料时(M20或M25),排气微粒数浓度主要集中在核态微粒区域,微粒质量浓度主要集中在集聚态微粒区域,其

中M25燃料的微粒排放性要优于M20燃料;随着点火定时的提前,排气微粒数浓度和质量浓度均有所升高;随着喷油定时的提前,排气微粒数浓度降低,微粒质量浓度升高。

Zhang等人^[55]发现引入EGR和添加乙醇类似,有明显的充量冷却效果,最大微粒数量随着EGR的增加而减小且峰值位置向小粒径方向偏移。由于核模态颗粒主要成分是HC化合物,因此核模态颗粒占总颗粒的比例随EGR而增加。此外,高EGR率下的燃烧温度降低,燃料热解和脱氢反应生成的一次碳粒减少,故积聚态浓度及其比例降低。类似的,增加乙醇/丁醇比例,积聚态显著减少。当比例达到20%以后,E20的积聚态占总颗粒数目的比例降低到11.1%,表明核模态占主导地位。这可以归结于3个原因:(1)醇比例增加引起的燃烧温度降低,燃料液滴的热解和脱氢分支反应产生的一次碳颗粒减少;(2)积聚态颗粒与PAH密切相关,汽油醇减少了芳香烃的比例;(3)混合燃料中的氧含量提高了碳烟的氧化速率。

4 工况循环对微粒排放的影响

直喷式发动机的微粒排放是否满足相关的标准需要在底盘测功机上运行规定的工况循环。同一台发动机运行不同的循环,得到的测试结果是不同的。目前的排放测试循环主要有美国联邦FTP-75循环、欧洲NEDC循环、US06循环、以及美国加州的UC循环。如图4所示为FTP-75循环和欧洲NEDC循环的比较。

整车的微粒质量排放和微粒数量排放受循环特性影响很大。图5所示为一台PFI发动机和GDI发动机在运行NEDC循环的微粒排放历程^[38]。可以发现发动机尾气在冷启动和冷态过渡状态下会产生很高微粒数量浓度;而一旦PFI发动机进入热机后(300 s以后),PN峰值会显著降低,但是GDI仍然存在很高的峰值。此外,值得注意的是GDI发动机即使在热机状态下,发生工况过渡的时候也会产生很高的微粒数量峰值。

Kim等人^[56]对一台GDI汽油机运行NEDC循环和FTP-75循环的微粒排放进行了比较。结果也证实了在NEDC循环下不管任何燃料在启动阶段的微粒数量都存在一个非常高的峰值,因为在此阶段大量燃油吸附在活塞上而难于蒸发,且喷射结束时刻接近于止上点而导致湿壁燃料很多。Karavalakis等人^[57]在两款轻型车上分别对E10, E15, E10+B8(氧含量与E15相当), E20, B16(氧含量与E10相当)利用底盘测功机上

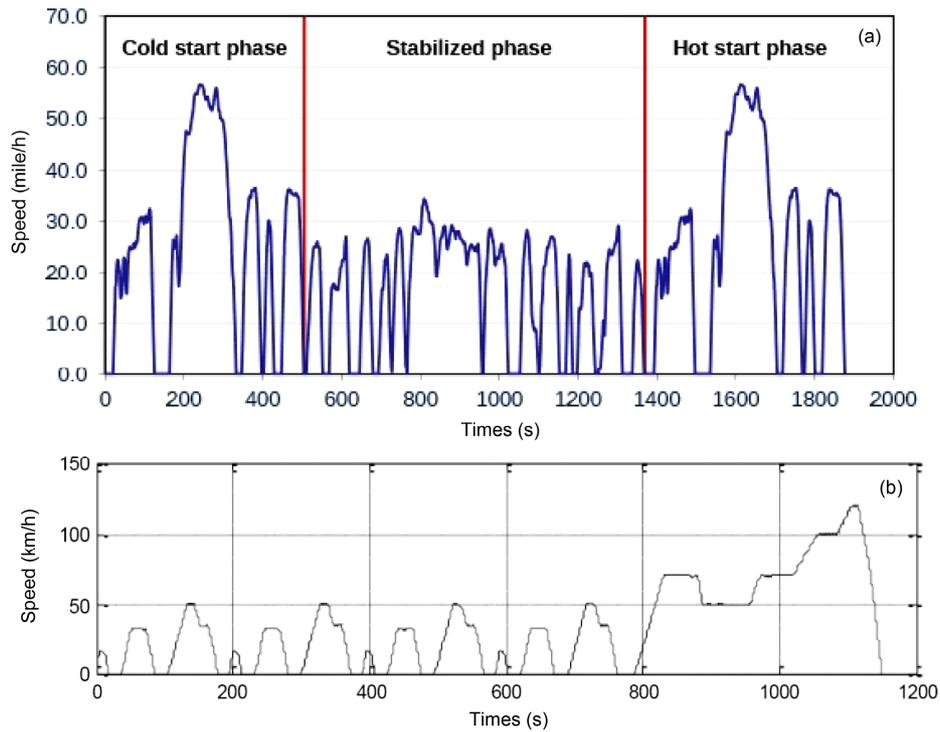


图 4 (网络版彩色)FTP-75 循环和NEDC循环的比较. (a) FTP-75 循环; (b) NEDC循环
 Figure 4 (Color online) Comparison on FTP-75 and NEDC cycles. (a) FTP-75 cycle; (b) NEDC cycle

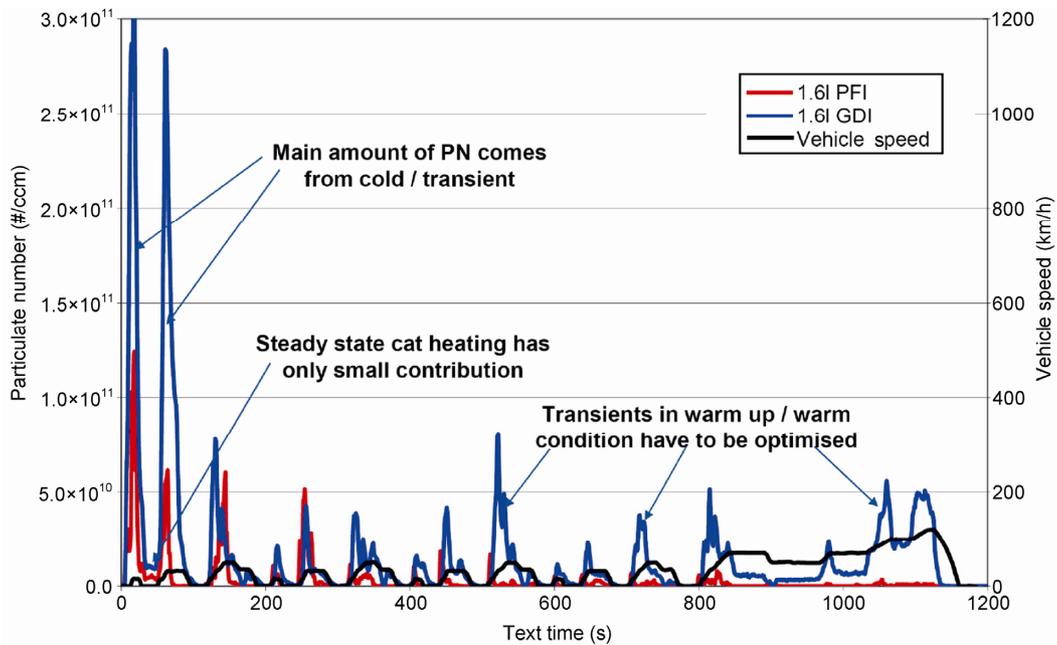


图 5 (网络版彩色)工况循环对微粒排放的影响^[38]
 Figure 5 (Color online) Effect of driving cycles on PM emissions^[38]

运行FTP75循环和加州UC循环,发现UC循环的数量浓度比FTP循环高,其原因在于UC循环的高速高负

荷权重较高. Khalek等人^[58]对一台2009 GDI发动机分别运行FTP-75和US06循环的微粒特性进行测试,表

明冷启动和加速过程是微粒排放的主导因素。

5 总结与展望

由于发动机微粒排放对环境与人类健康的极大危害性,欧洲和美国已经针对直喷式汽油机的微粒质量排放和数量浓度进行了排放立法,我国也即将在国六法规中加入相应的标准限值。由于微粒排放的复杂性和难于重复性,国际上针对这一问题开展了大量的研究,发现了直喷式汽油机微粒排放主要源于缸内混合气局部分层燃烧以及燃油喷射过程的附壁油膜发生非预混合燃烧。探明了燃料物理化学特性特别是饱和蒸汽压和分子结构(等效双键个数)与微粒质量排放和数量排放之间的关系,初步揭示了发动机运行条件包括燃空当量比、燃油喷射压力和喷射次数、废气再循环、冷启动、环境温度对微粒排放的影响规律。由于进气道喷射发动机的微粒排放显著低于直喷发动机,国际上也提出进气道喷射加缸内直喷的新型混合气制备方式,从而可以显著减少微粒质量排放和集聚态颗粒浓度。由于乙醇很早

就开始部分替代汽油,且乙醇沸点低、含氧,但是对乙醇汽油发动机的研究发现,汽油添加乙醇可以改善浓混合气下的微粒排放,但是在计量比条件下的微粒排放规律却受到发动机水平、混合气制备方式、控制策略等因素的影响。此外,由于直喷式汽油机的微粒排放是在整车条件下进行测试,因此最终的微粒排放水平受法规工况循环的影响,同一发动机在不同法规下的测试结果完全不同。

值得注意的,尽管国际上针对直喷式汽油机微粒排放开展了大量的试验研究,总结了一些初步规律,也对控制策略进行了初步探索,但是仍然有许多科学问题有待解决,主要包括:(1)直喷式汽油机超细微粒的生成机理,汽油中组分众多,各种组分的分子结构与成分、物理特性(沸点、黏度、饱和蒸汽压)等是如何影响微粒生成与演化这一动态过程;(2)微粒排放的可重复性精确测量;(3)各种工况条件下的发动机微粒排放实时控制;(4)乙醇汽油机的超细微粒生成机理与燃烧控制策略;(5)其他替代燃料的微粒生成机理与控制策略;(6)先进高效的微粒过滤技术。

参考文献

- Kittelson D B. Engines and nanoparticles: A review. *J Aerosol Sci*, 1998, 29: 575–588
- Wei C F, Dong W, Yu X M, et al. Influences of ignition advance angle on GDI engine particulate emission (in Chinese). *Vehicle Eng*, 2014, (3): 25–28 [魏传芳, 董伟, 于秀敏, 等. 点火提前角对直喷汽油机微粒排放特性的影响. *车用发动机*, 2014, (3): 25–28]
- Fu H C, Li X Y, Wang J H, et al. An experimental study on particulate emission characteristics of GDI and PFI vehicles (in Chinese). *Automot Eng*, 2014, 36: 1163–1170 [付海超, 李昕晏, 王建海, 等. GDI与PFI汽车微粒排放特性的试验研究. *汽车工程*, 2014, 36: 1163–1170]
- Pei Y Q, Zhang J Y, Qing J, et al. Effect of starting idling condition and mixture concentration of a turbocharged GDI engine on particle emission (in Chinese). *J Tianjin Univ (Sci Technol)*, 2014, 47: 892–897 [裴毅强, 张建业, 秦静, 等. 增压直喷汽油机启动怠速及混合气浓度对微粒排放的影响. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2014, 47: 892–897]
- Zhong B, Hong W, Su Y, et al. Effects of ignition timing on particulate emission in idling for gasoline direct injection engine (in Chinese). *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2015, 49: 32–37 [钟兵, 洪伟, 苏岩, 等. 点火时刻对怠速工况缸内直喷汽油机微粒排放特性的影响. *西安交通大学学报*, 2015, 49: 32–37]
- Wang-Hansen C, Ericsson P, Lundberg B, et al. Characterization of particulate matter from direct injected gasoline engines. *Top Catal*, 2013, 56: 446–451
- Price P, Stone R, Collier T, et al. Dynamic particulate measurements from a DISI vehicle: A comparison of DMS500, ELPI, CPC and PASS. *SAE*, 2006-01-1077
- Srivastava D K, Agarw A K, Gupta T. Effect of engine load on size and number distribution of particulate matter emitted from a direct injection compression ignition engine. *Aerosol Air Qual Res*, 2011, 11: 915–920
- Tree D R, Svensson K I. Soot processes in compression ignition engines. *Prog Energy Combust Sci*, 2007, 33: 272–309
- Merkisz J, Oielecha J. *Nanoparticle Emissions from Combustion Engines*. Switzerland: Springer International Publishing, 2015
- Battin-Leclerc F, Smile J M, Blurock E. *Cleaner Combustion*. London: Springer-Verlag, 2013
- Wang H, Frenklach M. A detailed kinetic modeling study of aromatics formation in laminar premixed acetylene and ethylene flames. *Combust Flame*, 1997, 110: 173–221
- Pope C J, Miller J A. Exploring old and new benzene formation pathways in low-pressure premixed flames of aliphatic fuels. *P Combust Inst*, 2000, 28: 1519–1527

- 14 Shukla B, Susa A, Miyoshi A, et al. Role of phenyl radicals in the growth of polycyclic aromatic hydrocarbons. *J Phys Chem A*, 2008, 112: 2362–2369
- 15 Shukla B, Koshi M. Comparative study on the growth mechanisms of PAHs. *Combust Flame*, 2011, 158: 369–375
- 16 Ketterer J E, Cheng W K. On the Nature of particulate emissions from DISI engines at Cold-Fast-Idle. SAE, 2014-01-1368
- 17 Aikawa K, Sakurai T, Jetter J J. Development of a predictive model for gasoline vehicle particulate matter emissions. SAE, 2010-01-2115
- 18 Aikawa K, Jetter J J. Impact of gasoline composition on particulate matter emissions from a direct-injection gasoline engine: Applicability of the particulate matter index. *Int J Engine Res*, 2014, 15: 298–306
- 19 Leach F, Stone R, Richardson D. The influence of fuel properties on particulate number emissions from a direct injection spark ignition engine. SAE, 2013-01-1558
- 20 Oh C, Cha G. Influence of oxygenate content on particulate matter emission in gasoline direct injection engine. *Int J Auto Tech*, 2013, 14: 829–836
- 21 Wang C M, Xu H M, Herreros J M, et al. Impact of fuel and injection system on particle emissions from a GDI engine. *Appl Energ*, 2014, 132: 178–191
- 22 Wang C M, Xu H M, Herreros J M, et al. Fuel effect on particulate matter composition and soot oxidation in a direct-injection spark ignition (DISI) engine. *Energ Fuel*, 2014, 28: 2003–2012
- 23 Vuk C, Griend S J V. Fuel property effects on particulates in spark ignition engines. SAE, 2013-01-1124
- 24 Bonatesta F, Chiappetta E, Rocca A L. Part-load particulate matter from a GDI engine and the connection with combustion characteristics. *Appl Energ*, 2014, 124: 366–376
- 25 Pei Y Q, Qin J, Pan S Z. Experimental study on the particulate matter emission characteristics for a direct-injection gasoline engine. *P I Mech Eng D-J Aut*, 2014, 228: 604–616
- 26 Choi K, Kim J, Ko A, et al. Evaluation of time-resolved nano-particle and THC emissions of wall-guided GDI engine. SAE, 2011-28-0022
- 27 He X, Ireland J C, Zigler B T, et al. The impacts of mid-level biofuel content in gasoline on SIDI engine-out and tailpipe particulate matter emissions. SAE, 2010-01-2125
- 28 Hedge M, Weber P, Gingrich J, et al. Effect of EGR on particle emissions from a GDI engine. SAE, 2011-01-0636
- 29 Price P, Stone R, OudeNijeweme D, et al. Cold start particulate emissions from a second generation DI gasoline engine. SAE, 2007-01-1931
- 30 Whelan I, Timoney D, Smith W, et al. The effect of a three-way catalytic converter on particulate matter from a gasoline direct-injection engine during cold-start. SAE, 2013-01-1305
- 31 Chan T W, Meloche E, Kubsh J, et al. Impact of ambient temperature on gaseous and particle emissions from a direct injection gasoline vehicle and its implications on particle filtration. SAE, 2013-01-0527
- 32 Magara-Gomez K T, Olson M R, McGinnis J E, et al. Effect of ambient temperature and fuel on particle number emissions on light-duty spark-ignition vehicles. *Aerosol Air Qual Res*, 2014, 14: 1360–1371
- 33 Bielaczyc P, Woodburn J, Szczotka A. Particulate emissions from european vehicles featuring direct injection spark ignition engines tested under laboratory conditions. SAE, 2014-01-1608
- 34 Andersson J, Collier A, Garrett M, et al. Particle and sulphur species as key issues in gasoline direct injection exhaust. *Nippon Kikai Gakkai*, 1999
- 35 Zhang S, McMahon W. Particulate emissions for LEV II light-duty gasoline direct injection vehicles. SAE, 2012-01-0442
- 36 Daniel R, Xu H M, Wang C M, et al. Gaseous and particulate matter emissions of biofuel blends in dual-injection compared to direct-injection and port injection. *Appl Energ*, 2013, 105: 252–261
- 37 Piock W, Hoffmann G, Berndorfer A, et al. Strategies towards meeting future particulate matter emission requirements in homogeneous gasoline direct injection engines. SAE, 2011-01-1212
- 38 Whitaker P, Kapus P, Ogris M, et al. Measures to reduce particulate emissions from gasoline DI engines. SAE, 2011-01-1219
- 39 Kim Y, Kim Y, Jun S, et al. Strategies for particle emissions reduction from GDI engines. SAE, 2013-01-1556
- 40 Fatouraie M, Wooldridge M, Wooldridge S. In-cylinder particulate matter and spray imaging of ethanol/gasoline blends in a direct injection spark ignition engine. SAE, 2013-01-0259
- 41 Chen L F, Stone R, Richardson D. Effect of the valve timing and the coolant temperature on particulate emissions from a gasoline direct-injection engine fuelled with gasoline and with a gasoline-ethanol blend. *P I Mech Eng D-J Aut*, 2012, 226: 1419–1430
- 42 Shuai S J, Zheng R, Wang Y H, et al. Experimental study on the characteristics of particulate emissions from GDI engines (in Chinese). *J Automot Safe Energ*, 2014, 5: 304–310 [帅石金, 郑荣, 王银辉, 等. 缸内直喷汽油机微粒排放特性的试验研究. *汽车安全与节能学报*, 2014, 5: 304–310]
- 43 Chen L, Braisher M, Crossley A, et al. The influence of ethanol blends on particulate matter emissions from gasoline direct injection engines. SAE, 2010-01-0793
- 44 Lee K O, Seong H, Sakai S, et al. Detailed morphological properties of nanoparticles from gasoline direct injection engine combustion of ethanol blends. SAE, 2013-24-0185

- 45 Chen L, Stone R, Richardson D. A study of mixture preparation and PM emissions using a direct injection engine fuelled with stoichiometric gasoline/ethanol blends. *Fuel*, 2012, 96: 120–130
- 46 Bielaczyc P, Szczotka A, Woodburn J. The impact of fuel ethanol content on particulate emissions from light-duty vehicles featuring spark ignition engines. SAE, 2014-01-1463
- 47 Chen L, Xu F, Stone R, et al. Spray imaging, mixture preparation and particulate matter emissions using a GDI engine fuelled with stoichiometric gasoline/ethanol blends. Conference on Internal Combustion Engines-Improving Performance, Fuel Economy Emissions, London, 2011. 43–52
- 48 Chen L, Stone R. Measurement of enthalpies of vaporization of isooctane and ethanol blends and their effects on PM emissions from a GDI engine. *Energ Fuel*, 2011, 25: 1254–1259
- 49 Price P, Twiney B, Stone R, et al. Particulate and hydrocarbon emissions from a spray guided direct injection spark ignition engine with oxygenate fuel blends. SAE, 2007-01-0472
- 50 Storey J, Barone T, Norman K, et al. Ethanol blend effects on direct injection spark-ignition gasoline vehicle particulate matter emissions. SAE, 2010-01-2129
- 51 Dimou I, Kar K, Cheng W. Particulate matter emissions from a direct injection spark ignition engine under cold fast idle conditions for ethanol-gasoline blends. SAE, 2011-01-1305
- 52 Di Iorio S, Lazzaro M, Sementa P, et al. Particle size distributions from a DI high performance SI engine fuelled with gasoline-ethanol blended fuels. SAE, 2011-24-0211
- 53 Karavalakis G, Short D, Vu D, et al. Evaluating the regulated emissions, air toxics, ultrafine particles, and black carbon from SI-PFI and SI-DI vehicles operating on different ethanol and iso-butanol blends. *Fuel*, 2014, 128: 410–421
- 54 Li X, Pei Y Q, Qing J, et al. Investigation on particulate matter emission of GDI engine fuelled with methanol and gasoline-methanol blends (in Chinese). *Chin Intern Combust Engine Eng*, 2015, 36: 1–6 [李翔, 裴毅强, 秦静, 等. GDI 发动机燃用甲醇及甲醇/汽油混合燃料的微粒排放特性研究. *内燃机工程*, 2015, 36: 1–6]
- 55 Zhang Z, Wang T Y, Jia M, et al. Combustion and particle number emissions of a direct injection spark ignition engine operating on ethanol/gasoline and *n*-butanol/gasoline blends with exhaust gas recirculation. *Fuel*, 2014, 130: 177–188
- 56 Kim Y H, Kim Y J, Kang J, et al. Fuel effect on particle emissions of a direct injection Engine. SAE, 2013-01-1559
- 57 Karavalakis G, Short D, Hajbabaie M, et al. Criteria emissions, particle number emissions, size distributions, and black carbon measurements from pfi gasoline vehicles fuelled with different ethanol and butanol blends. SAE, 2013-01-1147
- 58 Khalek I A, Bougher T, Jetter J J. Particle emissions from a 2009 gasoline direct injection engine using different commercially available fuels. SAE, 2010-01-2117

Recent progress in particle matter emissions and control strategies of gasoline direct injection engines

ZHU XiaoHui¹, QIAN Yong² & LÜ XingCai²

¹ Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201201, China;

² School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

The gasoline direct engine has been widely used in light vehicles due to their high thermal efficiency, but it has disadvantage of particle matter (PM) emissions. Due to the potential carcinogenic, mass of PM and particle number of gasoline direction engine have been restricted in future emission standards. Faced to this newly issue, a large number of researches has been conducted in worldwide. It is found that particulate emissions from direct injection gasoline engine comes mainly from stratified combustion and un-premixed combustion of adhered fuel at piston surface, cylinder wall, valve surface, etc. Thus, the fuel/air mixture preparation strategy, fuel injection parameters, fuel physical-chemical properties, operating condition, environmental condition play vital influence on mass and number of PM. Moreover, driving cycle also does important effect on the testing results of the GDI engine. Based on above-mentioned background, this paper system documented the recently progress in this topic, and summarized the PM formation channels, influential factors and control strategy, PM emissions of gasoline-alcohol blend fuels, effect of driving cycle on PM emissions. At the end of this paper, prospection and future research direction are discussed.

gasoline direct injection engines, partical mass, partical number, influence factors, control strategies

doi: 10.1360/N972015-00381