

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0988

姚春德,危红媛,耿培林,等.2015.MMT 对 GDI、PFI 汽油机微粒排放的影响[J].环境科学学报,35(9):2766-2772

Yao C D, Wei H Y, Geng P L, et al. 2015. Effect of MMT gasoline additive on PM emissions from a GDI and PFI gasoline engine[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(9): 2766-2772

## MMT 对 GDI、PFI 汽油机微粒排放的影响

姚春德\*, 危红媛, 耿培林, 窦站成, 刘辰, 王全刚

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072

收稿日期: 2014-09-15 修回日期: 2014-10-30 录用日期: 2014-10-30

**摘要:**为研究 MMT 对 GDI、PFI 汽油机微粒排放数量浓度以及质量浓度的影响,利用 DMS500 快速型微粒光谱仪,对一台增压缸内直喷(GDI)汽油机和一台自然吸气式气道喷射(PFI)汽油机燃用基础油以及在基础油中添加有机锰(MMT)的燃油的微粒排放特性进行了试验研究.结果表明:MMT 的添加均会增加 GDI、PFI 汽油机的微粒排放,燃用不同含 Mn 量的燃油,各负荷下 GDI 汽油机的微粒数量浓度均明显高于 PFI 汽油机.中小负荷下 GDI、PFI 汽油机微粒排放数量浓度以及质量浓度均随着 Mn 含量的增加而上升.大负荷下,PFI 汽油机微粒数量浓度随着 Mn 含量的增加而上升,但 GDI 汽油机则是在燃用不含 Mn 的燃油时微粒数量浓度最低,而后随着燃油中 Mn 含量的增加,超细微粒数量浓度的峰值反而逐步降低.GDI、PFI 汽油机核模态与积聚模态微粒数量变化的规律相似.

**关键词:**MMT; GDI 汽油机; PFI 汽油机; 微粒

文章编号: 0253-2468(2015)09-2766-07 中图分类号: X701 文献标识码: A

## Effect of MMT gasoline additive on PM emissions from a GDI and PFI gasoline engine

YAO Chunde\*, WEI Hongyuan, GENG Peilin, DOU Zhancheng, LIU Chen, WANG Quangang

State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072

Received 15 September 2014; received in revised form 30 October 2014; accepted 30 October 2014

**Abstract:** In order to understand the effect of the organometallic antiknock additive MMT (methylcyclopentadienyl manganese tricarbonyl) on PM (particulate matter) mass and number concentrations from GDI (gasoline direct injection) and PFI (port fuel injection) gasoline engine, PM emissions were measured from a turbocharged GDI gasoline engine and a naturally aspirated PFI gasoline engine operating on a baseline fuel or the baseline fuels blending with different ratios of MMT. The measurements were conducted by means of DMS500 analyzer with fast response particulate. Measurement results showed that, compared with baseline fuel, the addition of MMT could increase PM emissions from both GDI and PFI gasoline engine. PM number concentrations from GDI gasoline engine was consistently higher than that of PFI gasoline engine operating on fuels with different MMT contents under different loads. As the MMT content of fuels increased, PM mass and number concentrations from GDI and PFI gasoline engine both increased under small and medium loads. At high load, PM number concentrations from PFI gasoline engine increased with the MMT content of fuels, but for GDI gasoline engine, its PM number concentrations were the lowest while operating on MMT-free gasoline, then the peak number concentrations of micro-particle decreased with the MMT content of fuels. The number of nucleation and accumulation mode PM from GDI and PFI gasoline engine followed the same trend.

**Keywords:** MMT; GDI gasoline engine; PFI gasoline engine; particle matter

### 1 引言(Introduction)

甲基环戊二烯三羟基锰(MMT)是一种高效清洁的汽油抗爆剂,其于 1959 年首先在美国推出,1974 年以来作为汽油抗爆剂在多个国家得到广泛

使用,1997 年 MMT 进入我国,并于 1999 年被批准限量使用(张志福等,2012).MMT 的抗爆机理与四乙基铅相似.MMT 在高温下发生分解产生游离锰,游离锰很容易与空气中的氧作用,生成氧化锰的颗粒(MnO),使正构烷烃氧化生成的过氧化物进一步

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51176135)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.51176135)

作者简介: 姚春德(1955—),男,教授(博士); \* 通讯作者(责任作者),E-mail: arcdyao@tju.edu.cn

Biography: YAO Chunde(1955—), male, professor(Ph.D.); \* Corresponding author, E-mail: arcdyao@tju.edu.cn

反应成为醛、酮或其他环氧化合物,将火焰前链的分支反应破坏,使反应链中断,并降低了释放能量的速度,因此着火诱导期延长,提高燃料的抗爆性(陈军锋,2011).加拿大自 1978 年以来几乎在全部无铅和含铅汽油中使用,但在使用中因其排放物是否有毒有一定争议,曾经一度被禁止(格格托雅等,1999).长期慢性暴露于 MMT 环境中可引起肝脏和肾脏损害,这对于某些特殊职业者会造成锰中毒,症状类似于帕金森综合症.美国环境保护署的研究表明,人体对摄入的锰在很大范围内有分解代谢机制,空气中锰含量浓度低于  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时对人体(即使婴幼儿和老人)的健康不会构成威胁.当前普遍认为合理控制汽油中锰的含量利大于弊,我国允许在一定浓度范围内添加(白燕等,2012).

为探究 MMT 的添加对车辆或发动机性能以及排放的影响,国内外学者进行了大量的试验研究.Nelson 等用扫描式电子显微镜对一台 GM 3-800 汽油机分别燃用普通汽油和添加了 MMT 的汽油时其燃烧室颗粒物的沉积情况进行了检测,通过定性分析后发现气缸盖沉积物中主要有 C、Mn、O 以及 S 等元素,活塞顶部沉积物则包括额外的 P、Ca 和 Zn 等元素(Nelson *et al.*, 2002).Ardeleanu 等使用城市(UDDS)以及高速公路(HWFET)行驶循环对 9 辆车(8 辆燃用添加 MMT 的汽油,1 辆燃用未添加 MMT 的汽油作为对照)进行测试,以研究不同类型车辆在燃用添加 MMT 的汽油和未添加 MMT 的基础汽油时尾气中含 Mn 颗粒物的排放率以及理化特性(Ardeleanu *et al.*, 1999).Roos 等进行了高里程的车辆试验,以评价燃用添加了 MMT 的汽油与未添加 MMT 的基础汽油相比,其能降低磷化物对催化

器性能不利影响的潜力,结果发现燃用基础汽油的车辆与燃用添加了 MMT 的汽油的车辆相比,其催化器内的磷含量更高,催化活性较低,催化器对排气中 CO 和  $\text{NO}_x$  的转化效率有了明显的劣化(Roos *et al.*, 2000).张志福等对装有缸内直喷汽油机的瑞麒 V7 轿车分别进行了道路试验和代表极限使用工况的发动机台架试验,研究了 MMT 对缸内直喷汽油机性能的影响(张志福等,2012).郭红松等在底盘测功机上利用 ELPI 等设备就 MMT 对轻型 GDI 车辆 PM/PN/PAHs 等排放的影响进行了研究,发现汽油中锰浓度由 0 提高到  $21.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,GDI 车辆尾气中 PN 排放呈增加趋势,最大增幅超过 1 倍;PM 中 PAHs 含量和排放质量却显著下降(郭红松等,2014).新兴的 GDI 技术是未来节能汽车的一个发展趋势.尽管国内外学者关于 MMT 对车辆以及发动机影响的研究并不少,但是鲜有关于 MMT 对 GDI、PFI 汽油机微粒排放影响的对比研究.鉴于此,笔者分别对 GDI、PFI 汽油机燃用添加了 MMT 以及未添加 MMT 的汽油的微粒排放进行了研究,以通过对比分析 MMT 对 GDI、PFI 汽油机微粒排放的影响.

## 2 试验装置及试验方法(Experiment and methods)

### 2.1 试验装置

试验所用的发动机分别为一台 2.0 L 双顶置凸轮轴自然吸气式电控车用 PFI 汽油机以及一台直列 4 缸增压 GDI 汽油机,其主要技术参数见表 1.试验所用瞬态油耗测量仪、空燃比仪以及缸压传感器分别为 FCM-02 瞬态油耗测量仪、德国 ETAS 公司的 LA4-4.9 空燃比仪以及瑞士 KISTLER 公司的 6 117BFD16 缸压传感器,主要仪器设备详见表 2.

表 1 GDI、PFI 汽油机主要技术参数

Table 1 Main technical specifications of GDI and PFI engines

参数	发动机型式	缸径/mm	冲程/mm	压缩比	排量/L
GDI 发动机	增压直列 4 缸	82.5	84.2	9.6	1.8
PFI 发动机	四冲程水冷火花点火	83	91	10	2.0

表 2 主要试验设备

Table 2 Main measurement instruments

名称	型号	厂家
瞬态油耗测量仪	FCM 03	杭州奕科机电技术有限公司
空燃比仪	LA4-4.9	德国 ETAS 公司
气体排放分析仪	MEXA-7 100DEGR	日本 Horiba 公司
缸压传感器	6 117BFD16	瑞士 KISTLER 公司
快速型微粒光谱仪	DMS500 SKII	英国 Cambustion 公司

微粒分析仪器使用的是 Cambustion 公司的 DMS500 快速型微粒光谱仪.DMS500 主要由取样管、稀释器、充电器、分级器、静电计和旋风分离器等组成.DMS500 快速型微粒光谱仪的粒径测量范围为  $5 \sim 1000 \text{ nm}$ ,对采集到的微粒提供 38 通道尺寸光谱,测试响应时间为 200 ms,数据采集频率为 10 Hz.检测时,发动机尾气首先经可加热取样管进入旋风

分离器,过滤掉直径大于 1000 nm 的大颗粒(以防大颗粒堵塞仪器),然后依次进入一、二级稀释器,对发动机尾气进行稀释,稀释后的取样气体通过充电器进行正电离子充电,然后进入分级器中,分级器根据电子迁移率对带电的微细颗粒进行分级,分级后的颗粒在静电计中产生相应的电流,通过测定相应的电流值来确定不同粒径颗粒的数浓度(吴威龙等,2011).

## 2.2 试验方法

试验使用的燃油分别是未添加 MMT 的专配的 R92 汽油作为基础油,记为 MMT0,在该基础油中添加 MMT 且其 Mn 含量分别为 8、12.5 和 17.5 mg·L<sup>-1</sup>

的含锰汽油,分别记为 MMT8、MMT12 和 MMT18.4 种油品的主要物化参数见表 3.试验中选取转速为 2000 r·min<sup>-1</sup>,扭矩为 30 N·m、90 N·m 和 150 N·m 低中高 3 个负荷工况来分析 MMT 添加剂对 GDI、PFI 汽油机微粒排放的影响.试验中依次使用 4 种汽油并检测发动机未经三效催化转化器处理前的微粒排放.一种燃油的试验完成后,先将燃油箱和燃油管路中的残余汽油清空,再更换另一种汽油,并使发动机燃用待更换燃油在 2000 r·min<sup>-1</sup>、90 N·m 工况下运转 15 min,以确保发动机油路内为待更换燃油.试验中保持发动机机油温度、冷却水温度和进气温度不变.

表 3 油品的主要物化参数

Table 3 Main properties of the fuels

燃油	研究法辛烷值	锰含量/(mg·L <sup>-1</sup> )	密度(20℃)/(kg·m <sup>-3</sup> )	T <sub>50</sub> /℃	T <sub>90</sub> /℃	蒸汽压/kPa	硫含量/ppm	苯含量(体积分数)	烯烃含量(体积分数)	芳烃含量(体积分数)
MMT0	92.8	0.000 1	728.0	84.0	165.0	60	<5	0.09%	0.5%	33%
MMT8	94.4	8	735.4	87.5	165.5	60	<5	0.09%	0.5%	33%
MMT12	94.5	12.5	735.4	89.5	165.5	60	<5	0.09%	0.5%	33%
MMT18	94.9	17.5	735.4	89.5	165.5	60	<5	0.09%	0.5%	33%

## 3 实验结果与分析(Result and discussion)

### 3.1 GDI、PFI 汽油机微粒数量浓度的比较

图 1 是燃用不同油品时 GDI、PFI 汽油机微粒数量浓度随负荷变化的比较.不论燃用哪种燃油,各负荷下 GDI 汽油机的微粒数量浓度均明显高于 PFI 汽油机,GDI 汽油机的超细微粒(粒径范围:4.87 nm <D<sub>p</sub> ≤ 13.3 nm)排放比 PFI 汽油机高出 1~3 个数量级.相比之下,PFI 汽油机的微粒数量浓度均维持在很低的水平,只有在燃用 MMT18 时才大幅增加.如图 1a 所示,在燃用 MMT0 时,各负荷下 GDI 汽油机的微粒数量浓度变化不是很大.且较于燃用其他 3 种燃油,燃用 MMT0 时微粒排放是最低的,这是因为在燃油中添加锰之后,其燃油燃烧后只能以各种锰的化合物排出,除部分沉积在发动机、排气管以及后处理器内之外,其余部分只能以颗粒物的形式排到大气中,使微粒排放升高.在燃用 MMT8、MMT12 以及 MMT18 这 3 种燃油时,GDI 汽油机的微粒数量浓度均呈现相同的规律:微粒数量浓度并不随着负荷的增加而上升,而是在大负荷时为最高,中等负荷却比小负荷稍有降低.大负荷时的微粒数量浓度最高,是因为大负荷要满足功率混合气的

需要,发动机需要加浓混合气,致使燃烧恶化,排出的微粒也较多.而小负荷时微粒数量浓度高于中等负荷,可能是由于小负荷时发动机燃料燃烧不完全所致.

图 2 给出了各负荷下 GDI、PFI 汽油机微粒数量浓度随 Mn 含量变化的比较.在中小负荷下,不论是 GDI 汽油机还是 PFI 汽油机,其微粒排放数量浓度均是随着 Mn 含量的增加而上升的.且中小负荷下,GDI 汽油机超细微粒排放数量浓度随着 Mn 含量的上升增幅比较均匀,而 PFI 汽油机在各负荷下燃用 MMT18 时微粒排放数量浓度均明显高于燃用其他 3 种燃油,说明 PFI 汽油机在燃用高含 Mn 量的燃油时,其微粒排放会显著上升,因此可以对 PFI 汽油机燃料中的 MMT 含量加以适当控制,从而减少微粒的生成.大负荷时不同发动机的微粒排放呈现不同的规律,PFI 汽油机微粒数量浓度还是随着 Mn 含量的增加而上升,但 GDI 汽油机则是在燃用 MMT0 时微粒数量浓度最低,而后超细微粒数量浓度的峰值随着 Mn 含量的增加反而逐步降低.对于 GDI 汽油机微粒数量浓度出现的这一特殊现象,分析了其可能的原因:MMT 中 Mn 的作用机理是使正构烷烃氧化生成的过氧化物转化为醛和酮,破坏甚

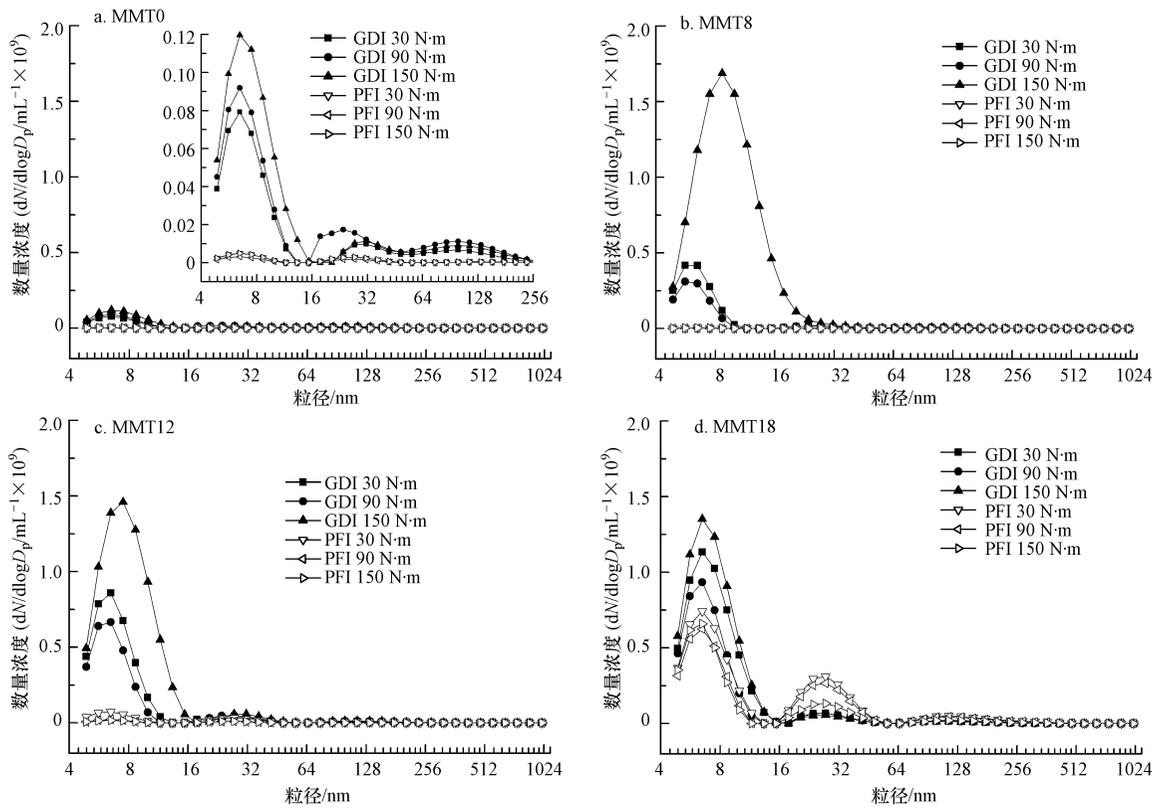
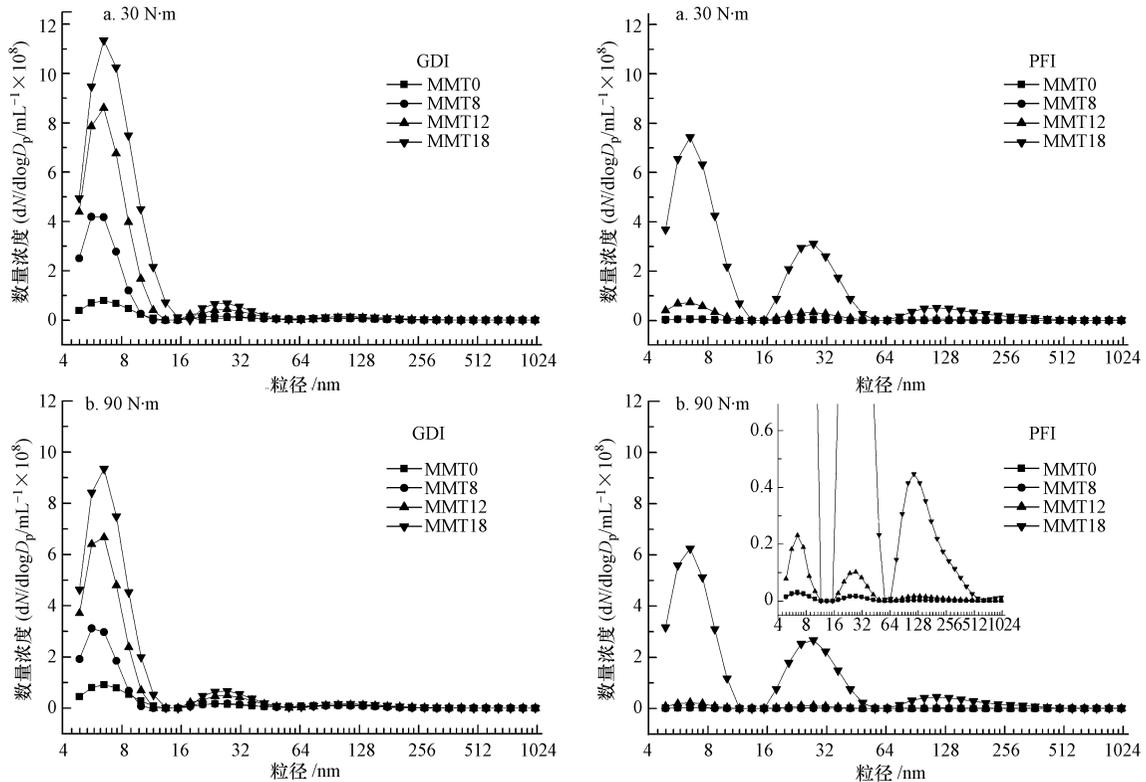


图 1 燃用不同燃油时 GDI、PFI 汽油机微粒排放数量浓度的比较

Fig.1 Comparison of PM number concentrations from GDI and PFI gasoline engine operating on different fuels



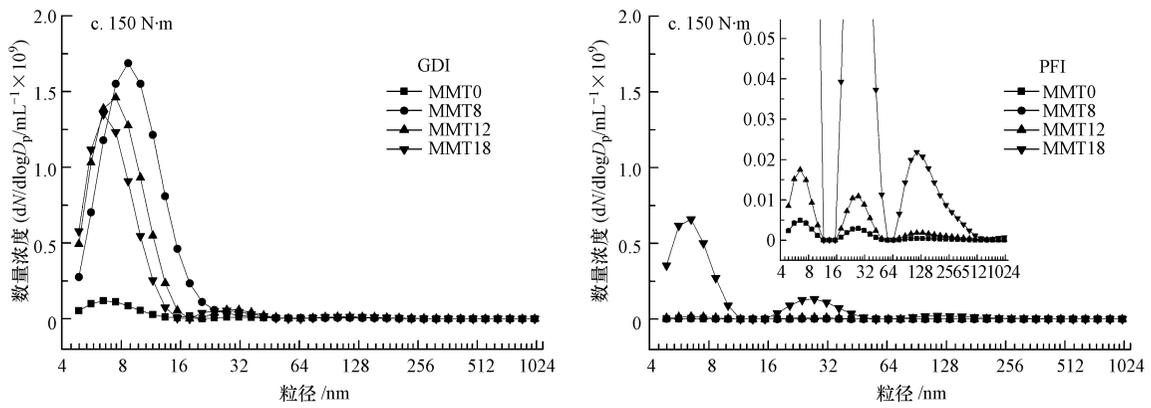


图2 各负荷下 GDI、PFI 汽油机微粒数量浓度随 Mn 含量变化的比较

Fig.2 Comparison of PM number concentrations from GDI and PFI gasoline engine operating on different fuels under 3 loads

至中断火焰前链的分支反应,从而降低燃料释放能量的速度,达到延长着火滞燃期和提高燃料抗爆性的效果(陈军锋等,2012).大负荷时 GDI 汽油机缸内燃烧温度较高,过氧化物不存在,MMT 不能起到抗爆的作用,故增加了大负荷时爆燃的可能;同时大负荷因为要满足功率混合气的要求,喷油量增加,导致过量空气系数减小,燃料燃烧不完全,二者的综合作用使得不同质量的 Mn 沉积在发动机燃烧室、气阀以及氧传感器内,可能导致该现象的发生.

3.1.1 GDI、PFI 汽油机核模态微粒数量随 Mn 含量变化的比较 如图 3 所示是各负荷下 GDI、PFI 汽油机核模态微粒(粒径范围:5 nm <math>D\_p \le 30 \text{ nm}</math>)数量随 Mn 含量变化的比较.由图可以看出在中小负荷, GDI 汽油机核模态微粒数量均随着 Mn 含量的增加而增加,在大负荷时则没有这样的规律,而是在燃

用 MMT0 时核模态微粒数量最少,而从燃用 MMT8 到 MMT18,核模态微粒数量反而逐步降低,这与微粒排放总的数量浓度有相同的趋势,可能导致该现象的原因不再赘述.PFI 汽油机各负荷下在燃用 MMT0、MMT8、MMT12 时核模态微粒数量均维持在很低的水平,只有在燃用 MMT18 时其数量才有明显的上升,但燃用不同含 Mn 量的汽油,其核模态微粒数量均低于 GDI 汽油机,尤其在燃用 MMT0、MMT8 以及 MMT12 时更为明显.大负荷时随着 Mn 含量的增加,GDI 汽油机的核模态微粒数量分别是 PFI 汽油机的 28 倍,311 倍,69 倍以及 2 倍.这与二者的燃烧方式有关,GDI 发动机采用较高的喷射压力使其油滴破碎得更快,更有利于更细密的混合气形成,故燃料燃烧后生成的微粒粒径比 PFI 汽油机小,但其数量更多.

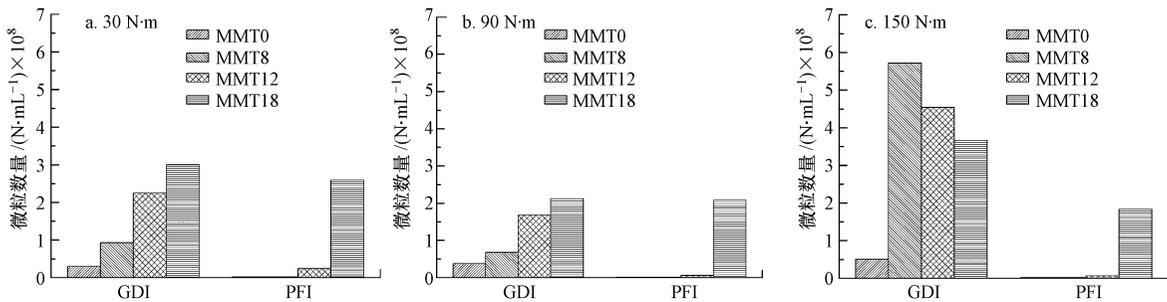


图3 各负荷下 GDI、PFI 汽油机核模态微粒数量随 Mn 含量变化的比较

Fig.3 Comparison of nucleation mode particles number concentrations from GDI and PFI gasoline engine operating on different fuels under 3 loads

3.1.2 GDI、PFI 汽油机积聚模态微粒数量随 Mn 含量变化的比较 图 4 给出了 GDI、PFI 汽油机积聚模态微粒(粒径范围:30 nm <math>D\_p \le 1000 \text{ nm}</math>)数量随 Mn 含量变化的比较.各负荷下积聚模态微粒数量随 Mn 含量的变化规律与核模态微粒数量的变化规律

相似.在中小负荷,GDI 汽油机积聚模态微粒数量也随着 Mn 含量的增加而增加,而在大负荷时则是在燃用 MMT0 时积聚模态微粒数量最少,而从燃用 MMT8 到 MMT18,积聚模态微粒数量逐步降低.PFI 汽油机各负荷下燃用 MMT0、MMT8、MMT12 时积聚

模态微粒数量均维持在很低的水平,只有在燃用 MMT18 时其数量才有明显的上升,在小负荷时甚至超过了 GDI 汽油机,比其高出 36.3%;而在大负荷燃用 MMT18 时,其积聚模态微粒数量与小负荷和中

等负荷相比有明显的降低,降幅分别为 83.5% 和 80.9%.中小负荷下,与燃用其他 3 种燃油相比,燃用 MMT18 时 PFI 汽油机的积聚模态微粒数量与 GDI 汽油机间的差距不是很大.

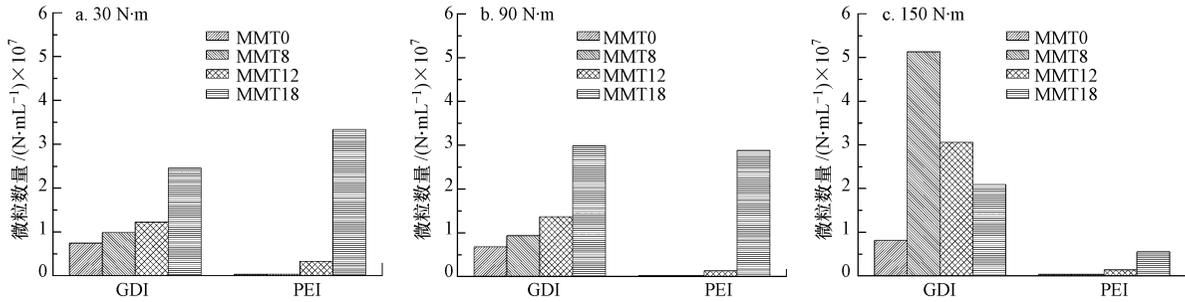


图 4 各负荷下 GDI、PFI 汽油机积聚模态微粒数量随 Mn 含量变化的比较

Fig.4 Comparison of accumulation mode particles number concentrations from GDI and PFI gasoline engine operating on different fuels under 3 loads

### 3.2 GDI、PFI 汽油机微粒质量浓度随 Mn 含量变化的比较

发动机微粒排放的总质量主要取决于积聚模

态微粒的数量,核模态在质量浓度分布曲线上几乎没有体现,如图 5 所示,是各负荷下 GDI、PFI 汽油机微粒质量浓度随燃油 Mn 含量变化的比较.在中

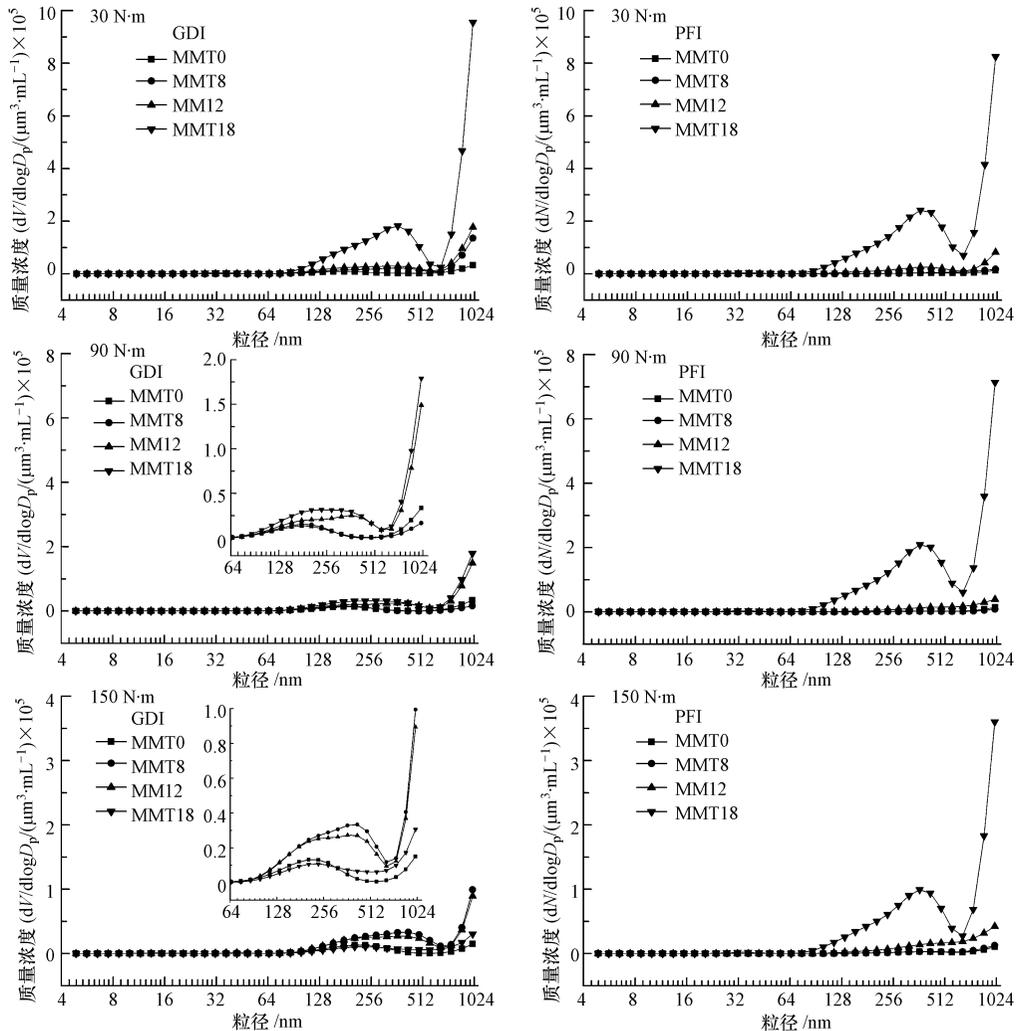


图 5 各负荷下 GDI、PFI 汽油机微粒质量浓度随 Mn 含量变化的比较

Fig.5 Comparison of PM mass concentrations from GDI and PFI gasoline engine operating on different fuels under 3 loads

小负荷下,不论是 GDI 汽油机还是 PFI 汽油机,微粒质量浓度均随着 Mn 含量的增加而增加.小负荷时,GDI 汽油机与 PFI 汽油机的微粒排放质量浓度随 Mn 含量的变化规律相似:在燃用 MMT18 时,其微粒质量浓度均明显高于燃用其他 3 种燃油,且燃用 MMT0、MMT8 以及 MMT12 时其微粒排放质量浓度相差不大.小负荷时不论 GDI 汽油机还是 PFI 汽油机,其燃料燃烧均不完全,燃用 MMT18 时由于其含锰量明显高于其他 3 种燃油,Mn 以硫酸盐、磷酸盐以及各种 Mn 的氧化物以微粒的形式排入大气中,致使微粒质量浓度骤升.在大负荷以及中等负荷,GDI 汽油机与小负荷时相比变化较大:在燃用 MMT18 和 MMT12 时,其微粒质量浓度相差不大,较之于燃用 MMT0 以及 MMT8,其增幅也不是很明显.在大负荷燃用不同含 Mn 量的燃油时,GDI 汽油机的排温均约为 670 °C,而此时 PFI 汽油机的排温才接近 630 °C.在燃用高含 Mn 量的燃油 MMT18 时,GDI 汽油机由于其排温较高,相较于 PFI 汽油机可以氧化掉更多微粒,故在大负荷燃用 MMT18 时,微粒质量浓度也不会呈现如 PFI 汽油机一样有明显高于燃用其他 3 种燃油的趋势.

#### 4 结论(Conclusions)

1) 不论是 GDI 汽油机还是 PFI 汽油机,在燃油中添加 MMT 均增加了发动机的微粒排放.

2) 不论燃用含 Mn 还是不含 Mn 的燃油,各负荷下 GDI 汽油机的微粒数量浓度均明显高于 PFI 汽油机,GDI 汽油机的超细微粒排放比 PFI 汽油机高出 1~3 个数量级.

3) 随着燃油中 Mn 含量的增加,中小负荷下 GDI、PFI 汽油机的微粒排放数量浓度随之上升.大负荷时,PFI 汽油机微粒数量浓度还是随着 Mn 含量的增加而上升,但 GDI 汽油机则是在燃用 MMT0 时微粒数量浓度最低,而从燃用 MMT8 到 MMT18,超细微粒数量浓度的峰值反而逐步降低.

4) PFI 汽油机各负荷下在燃用 MMT0、MMT8、MMT12 时核模态微粒数量均维持在很低的水平,只有在燃用 MMT18 时其数量才有明显的上升.GDI 汽

油机在中小负荷下核模态微粒数量均随着燃油中 Mn 含量的增加而增加,在大负荷下核模态微粒数量的变化趋势与该负荷下总的微粒数量浓度变化趋势一致.GDI、PFI 汽油机积聚模态微粒数量变化规律跟核模态微粒数量变化规律相似.

5) 在中小负荷下 GDI 和 PFI 汽油机的微粒质量浓度均随着 Mn 含量的增加而增加.但是在燃用 MMT18 汽油时,中等负荷以及大负荷下 GDI 和 PFI 汽油机排放的微粒质量浓度规律有差异.

**责任作者简介:**姚春德(1955—),男,博士,教授,天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室副主任,研究方向为内燃机代用燃料,燃烧过程和排放控制.E-mail:arcdyao@tju.edu.cn.

#### 参考文献(References):

- Ardeleanu A, Loranger S, Kennedy G, *et al.* 1999. Emission rates and physico-chemical characteristics of Mn particles emitted by vehicles using Methylcyclopentadienyl Manganese Tricarbonyl (MMT) as an octane improver[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 115(1/4): 411-427
- 白燕,成西涛,张存社,等. 2012. 车用汽油抗爆剂[J]. *广东化工*, 39(9): 29-30; 21
- 陈军锋. 2011. MMT 对三效催化性能影响的试验研究[D]. 北京: 清华大学
- 陈军锋,帅石金,肖建华. 2012. 含 MMT 汽油对三效催化剂老化性能影响的试验研究[J]. *汽车工程*, 34(2): 129-132
- 格根托雅,叶秋梅,刘炎武. 1999. 几种无铅汽油抗爆剂作用机理及工业应用[J]. *辽宁化工*, 28(3): 151-154
- 郭红松,曹磊,秦宏宇,等. 2014. MMT 对轻型 GDI 车辆 PM/PN/PAHs 排放的影响[OL]. *内燃机工程*, 2014-02-11, <http://www.cnki.net/kcms/detail/31.1255.TK.20140211.1123.009.html>
- Nelson A J, Reynolds J G, Roos J W. 2002. Comprehensive characterization of engine deposits from fuel containing MMT [J]. *Science of the Total Environment*, 295(1/3): 183-205
- Roos J W, Lenane D L, Dykes K L, *et al.* 2000. A Systems Approach to Improved Exhaust Catalyst Durability: The Role of the MMT Fuel Additive [N]. SAE Paper, 2000-01-1880
- 吴威龙,郑朝蕾,裴毅强,等. 2011. PFI 汽油机排气微粒数浓度及粒径分布研究[J]. *车用发动机*, (4): 58-62
- 张志福,舒歌群,梁兴雨,等. 2012. MMT 对缸内直喷汽油机性能影响的研究[J]. *汽车工程*, 34(2): 124-128