

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0304

吴涛阳,姚安仁,王辉,等.2020.基于燃料特性的汽油机颗粒物排放预测关系式[J].环境科学学报,40(1):102-110

Wu T Y, Yao A R, Wang H, et al. 2020. Predicting formula of particulate matter emission from gasoline engines based on fuel properties[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 40(1):102-110

基于燃料特性的汽油机颗粒物排放预测关系式

吴涛阳¹,姚安仁¹,王辉¹,李壮壮¹,姚春德^{1,*},闫俊杰²

1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室,天津 300072

2. 丰田汽车研发中心(中国)有限公司北京分公司,北京 100020

摘要:汽油机的颗粒物排放与所用燃料的性能密切相关.为评价燃料特性对汽油机颗粒物排放的影响,建立了一个简化 PN 指数(SPNI)关系式并进行了统计学检验.该指数包含 T70(70%蒸馏温度)、重芳烃(碳数 ≥ 9)含量、终馏点温度和烯烃含量 4 个关键的燃料参数.在试验和分析过程中配制了代表不同地区市场油的 20 种模型燃料,并对其燃料参数进行了相关性分析和多元线性回归.发动机试验结果表明,各种典型运行模式下的发动机实际颗粒物数量(PN)排放均与 SPNI 呈现高度的相关性.与已有的详细 PM 指数相比,该模型计算更为简便,可操作性强.该简化 PN 指数可用于工程上评价不同汽油燃料的颗粒物排放潜势.

关键词:汽油机;颗粒物排放;评价;燃料特性;简化 PN 指数

文章编号:0253-2468(2020)01-102-09

中图分类号:X701

文献标识码:A

Predicting formula of particulate matter emission from gasoline engines based on fuel properties

WU Taoyang¹, YAO Anren¹, WANG Hui¹, LI Zhuangzhuang¹, YAO Chunde^{1,*}, YAN Junjie²

1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072

2. Toyota Motor Engineering & Manufacturing (China) Co. Beijing Branch, Beijing 100020

Abstract: Particulate matter emissions (PM) from gasoline engines are closely related to the fuel used. In order to evaluate the impact of fuel properties on PM emission tendencies from gasoline engines, a simplified PN index (SPNI) formula was developed. The index covers four key fuel parameters of fuel, namely T70 (70% distillation temperature), heavy aromatics content, final boiling point temperature and olefins content. Twenty typical fuels representing market gasoline from different regions were formulated during the process of testing and analysis. Meanwhile, the correlation analysis and multivariate linear regression were performed on the parameters of these fuels. The results of the engine tests show that the actual PN emissions from the engine are highly correlated with the test fuel's SPNI in various typical operating modes. Compared with the existing detailed PM index (PMI), the SPNI is simpler to calculate and more operable. The SPNI can be used to evaluate the particulate matter emission potentials of different gasoline fuels in engineering.

Keywords: gasoline engines; particulate matter emission; evaluation; fuel properties; simplified PN index

1 引言(Introduction)

燃油机动车尾气中排出的颗粒物(particulate matter, PM)是我国城市大气污染物的重要组成部分(帅石金等, 2016).传统的气口喷射(port fuel injection, PFI)汽油机,其燃料与空气的混合时间长,有利于形成均质的混合气,在燃烧过程中产生的颗粒物较少.所以以往人们关注的焦点是采用扩散燃烧方式的柴油车的 PM 排放(Shuai et al., 2018).近

年来,缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)技术凭借较好的燃油经济性逐渐成为了汽油机的主流技术路线.GDI 汽油机将燃油直接喷进缸内,油气混合时间缩短,导致局部高当量比区域和附壁油膜的扩散燃烧,从而产生大量颗粒物排放(Kufferath et al., 2012).随着机动车排放法规的日益加严,汽油机的 PM 排放也成为了不可忽视的重要问题(付秉正等, 2017).

研究表明,除了发动机设计因素和控制策略以

收稿日期:2019-06-16

修回日期:2019-07-10

录用日期:2019-07-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No.51336005)

作者简介:吴涛阳(1990—),男,E-mail:wutaoyang@tju.edu.cn; * 责任作者,E-mail:aredyao@tju.edu.cn

外,燃料特性对汽油机的颗粒物排放也具有显著影响(Sobotowski *et al.*, 2015; Yinhui *et al.*, 2016). Cho 等(2015)发现 GDI 汽油机燃用 E20(含 20%乙醇体积分数的乙醇汽油)在其试验工况下的颗粒物数量(particle number, PN)排放比燃用汽油时最多降低 96%.Zhu 等(2017)的研究结果显示,当汽油中芳香烃含量和 T90(90%蒸馏温度)降低时,发动机的颗粒物质量和数量排放均显著降低.郑荣等(2016)的研究发现,无论是 PFI 还是 GDI 汽油机,当燃料中的芳烃、烯烃组分增加时,其 PM 排放也明显增加.Yao 等(2017)通过发动机试验研究进一步指出,燃料中的重芳烃(碳数 ≥ 9)含量比总芳烃含量对 GDI 汽油机 PM 排放的影响更加显著.

为了评估燃料特性对汽油机颗粒物排放的影响,许多学者研究了燃料参数与 PM 排放的数学关系.本田汽车公司的 Aikawa 等(2010)提出了详细 PM 指数(PM index, PMI)模型.该模型使用燃料中各组分的双键当量和 443 K 下的蒸汽压计算出各燃料组分对 PMI 的贡献,并将其按照质量分数进行加权求和.大量试验结果表明,PMI 与 PFI 汽油车的 PM 质量和数量排放均呈现显著的线性关系.随后, Aikawa 等(2014)又证实了该 PM 指数同样适用于 GDI 汽油车. Leach 等(2017)使用汽油混合物的蒸汽压代替 PMI 模型中各组分的蒸汽压,提出了一个 PN 指数模型. Chen 等(2015)使用正辛烷、异辛烷、二甲苯和乙醇 4 种燃料组分调制出了 9 种模型燃料,并测定它们在同一发动机工况下的 PN 排放数据,用多项式模型分别推导出了核态以及积聚态的 PM 指数.

在现有模型中, Aikawa 的 PMI 模型已经得到了广泛的试验验证,其预测精度最高(Chapman *et al.*, 2016).但该模型需要使用详细烃类分析法检测出每一种汽油组分的质量分数.普通的市场汽油一般含有 200~300 种组分, PMI 的分析计算过程十分复杂,使用成本高,目前多用于专业的实验室研究(Amara *et al.*, 2018).综上所述,尽管目前已经有几种评估燃料特性对发动机 PM 排放影响的数学模型,但是尚缺乏一种计算简便且能有效反映燃料与 PM 关系的工程模型.鉴于此,笔者在综合前人研究工作的基础上,提出了按照汽油生产过程中的组分含量和蒸馏温度不同,配制了 20 种代表不同地区实际市场油的模型燃料并测定了其详细理化参数.在双喷射(PFI+GDI)汽油机台架上测量不同燃料的

PN 排放.通过对燃料参数和 PN 排放数据进行数学建模分析和验证,旨在建立一个能够反映多成分汽油颗粒物排放潜势的实用的简化 PN 指数(simplified PN index, SPNI),从而为工程上评估发动机颗粒物排放趋势提供一种有效的分析方法.

2 材料和方法(Materials and methods)

2.1 模型燃料

本研究以芳香烃含量、烯烃含量、T10、T50、T90 等参数作为控制变量,委托某石化公司按照成品油的成分种类和调制方法配制出了 20 种模型燃料.这些模型燃料的组分和蒸馏特性各异且均满足国 V 车用汽油标准,可代表全国各地区不同的实际市场汽油.笔者对模型燃料分别进行了馏程测定和详细碳氢分析(detailed hydrocarbon analysis, DHA),并按照式(1)计算出了反映各燃料颗粒物排放潜能的燃料指标(PMI)(Aikawa *et al.*, 2010).模型燃料的详细理化参数见表 1.

$$PMI = \sum_{i=1}^n \left(\frac{DBE_i + 1}{V.P(443 K)_i} \times W_{t_i} \right) \quad (1)$$

式中, PMI 为本田详细 PM 指数. DBE_i 、 $V.P(443 K)_i$ 和 W_{t_i} 分别为组分 i 的双键当量, 443 K 下的蒸汽压以及质量分数.

2.2 建模方法

2.2.1 相关性分析及显著性检验 在选择与 PM 指数相关的燃料参数时,笔者使用一款统计学软件 SPSS 23.0(郝黎仁, 2003)对 20 种模型燃料的燃料参数与其对应的 PMI 进行相关性分析,并以皮尔逊相关性(r_{XY})来反映相关关系的强弱.皮尔逊相关性的计算方法如式(2)所示(Ott *et al.*, 2015).

$$r_{XY} = \frac{\sum (X_i - X)(Y_i - Y)}{\sqrt{\sum (X_i - X)^2} \sqrt{\sum (Y_i - Y)^2}} \quad (2)$$

式中, X 和 Y 分别表示变量 X 和变量 Y 的算术平均值. r_{XY} 的取值范围为-1 至 1,正值表示正相关,负值表示负相关.

在统计学上,判断两变量的相关关系时,除依据相关系数以外,还需对每组相关关系进行显著性检验以排除随机抽样误差的影响.一般地,0.05 常被作为显著性 F 检验的概率(p 值)判别临界值.本研究对每一组燃料参数与 PMI 的相关关系均进行了显著性检验(双尾 F 检验)(Ott *et al.*, 2015),并求出了相应的 p 值.其中, $p \leq 0.05$ 的燃料参数被认为与 PM 指数具有显著的相关关系.

表 1 模型燃料的理化参数

Table 1 Physical and chemical parameters of the model fuels

参数	RON	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 20 °C	RVP/ kPa	总芳烃 含量(体 积分数)	重芳烃 含量(体 积分数)	烯烃含 量(体积 分数)	初馏点 温度/°C	T10/°C	T50/°C	T70/°C	T90/°C	T95/°C	终馏点 温度/°C	C/H	氧含量	PMI	SPNI
F1	96.0	741.6	53.5	34.8%	10.3%	12.2%	35	55	90	107	132	164	171	6.396	0.000	1.060	1.194
F2	95.2	738.4	55.3	32.6%	11.6%	5.6%	35	53	98	128	154	176	195	6.474	0.000	1.860	2.097
F3	96.1	739.6	55.9	31.2%	15.0%	9.8%	35	50	99	138	171	184	196	6.463	0.000	2.220	2.253
F4	95.4	749.2	55.8	35.7%	16.9%	3.5%	35	50	105	150	177	188	198	6.530	0.000	2.640	2.726
F5	95.1	751.0	55.4	36.4%	26.0%	3.4%	35	49	109	162	182	189	199	6.576	0.000	3.260	3.341
F6	96.7	735.1	54.3	30.7%	10.1%	10.2%	36	53	91	117	152	171	195	6.429	0.000	1.740	1.749
F7	95.3	741.8	55.9	31.3%	18.5%	7.1%	33	49	101	147	178	187	198	6.519	0.000	2.630	2.655
F8	92.0	747.0	49.3	30.4%	16.5%	9.7%	37	55	96	134	166	180	199	6.485	0.000	2.010	2.326
F9	93.2	733.8	60.0	34.6%	18.8%	10.7%	32	51	92	112	160	174	189	6.511	0.000	1.870	1.997
F10	92.3	726.8	55.0	30.1%	8.2%	11.6%	33	52	93	107	141	159	189	6.353	0.000	1.400	1.390
F11	92.1	735.0	55.5	28.6%	16.6%	11.6%	33	51	92	111	160	173	191	6.246	0.000	1.770	1.878
F12	92.5	743.1	56.0	40.4%	6.4%	7.7%	33	52	94	111	135	153	186	6.805	0.000	1.450	1.446
F13	98.3	746.5	73.6	30.9%	8.5%	7.5%	33	49	88	111	151	179	196	6.369	2.430%	1.580	1.693
F14	99.4	748.3	72.9	30.7%	8.4%	7.3%	34	49	72	109	150	178	196	6.314	3.680%	1.550	1.675
F15	101.6	753.4	69.8	26.2%	7.3%	6.3%	34	52	71	85	147	173	194	5.980	7.730%	1.340	1.337
F16	95.7	749.5	87.3	29.8%	8.2%	7.4%	34	44	85	109	150	176	195	6.190	5.310%	1.500	1.638
F17	95.8	740.0	57.5	28.3%	9.4%	8.0%	34	53	96	109	144	162	191	6.400	0.020%	1.380	1.624
F18	95.1	740.0	56.0	28.8%	10.2%	7.9%	35	54	96	111	153	174	200	6.395	0.020%	1.600	1.825
F19	96.0	745.0	57.0	30.8%	13.2%	8.4%	36	52	96	115	162	183	206	6.467	0.020	2.040	2.091
F20	95.6	744.0	56.0	31.2%	20.0%	8.3%	35	52	100	120	173	189	207	6.417	0.020	2.390	2.497

注: RON 为研究法辛烷值; RVP 为雷德蒸汽压(kPa); 总芳烃含量, 总芳烃的体积分数; 重芳烃含量, 重质芳烃(碳数 ≥ 9)的体积分数; 烯烃含量, 燃料中烯烃的体积分数; IBP 为初馏点温度(°C); T_x 为 $x\%$ 蒸馏温度(°C); FBI 为终馏点温度(°C); C/H, 碳氢元素质量比; 氧含量, 氧元素质量分数; PMI 为详细 PM 指数(依据本田模型计算).

2.2.2 多元线性回归分析 在建立简化 PM 指数模型时,笔者使用 SPSS 23.0 软件(Spss, 2005)进行多元线性回归分析.将与燃料的详细 PM 指数 (PMI) 显著相关(p 值 ≤ 0.05) 的燃料参数设为自变量 X_i , 将 PMI 设为因变量 y , 建立的多元线性回归模型 (Ott *et al.*, 2015) 可由方程 (3) 来描述:

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \cdots + b_iX_i + \cdots + b_nX_n + e \quad (3)$$

式中, b_0 为常量, b_i 代表变量 X_i 的偏回归系数, e 为残差.

在进行多元线性回归分析时,如果自变量间存在共线性,回归系数的样本偏差会增大,从而削弱模型描述能力(郝黎仁, 2003).本研究采用“后退法”,逐步剔除 F 检验概率值 $p \geq 0.1$ 的自变量.在合理简化模型的同时,并不引起模型拟合精度的降低.

2.3 试验验证方案

2.3.1 试验燃料及装置 为了验证所建立的简化 PM 指数对实际发动机 PM 排放的预测能力,本研究使用 5 种燃料(F1~F5, SPNI 从 1.19 到 3.34, 燃料参数见表 1,) 在一台丰田双喷射汽油机台架上进行了

PN 排放测试试验.表 2 所示为试验发动机的技术参数.发动机测试台架的布置如图 1 所示.在测试过程中,发动机尾气中的 PN 排放由 DMS 500 MK II 型快速微粒分析仪测量.该仪器采用电迁移率分类法对不同粒径的颗粒物分别计数.该仪器测量的颗粒物粒径范围为 5 ~ 1000 nm, 采样流量为 $8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 以 10 Hz 的频率通过上位机软件输出颗粒物的粒径分布及数量浓度数据.

表 2 试验发动机的技术参数
Table 2 Specifications of the Test engine

参数	数值
型式	直列 4 缸, 四冲程
进气型式	自然吸气
缸径/冲程/mm	86/86
排量/L	2.0
压缩比	12.7
喷油系统	组合喷射 (PFI+GDI)
最大扭矩/转速/ ($\text{Nm}/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	199/4600
额定功率/转速/ ($\text{kW}/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	123/6500
排放标准	国 V

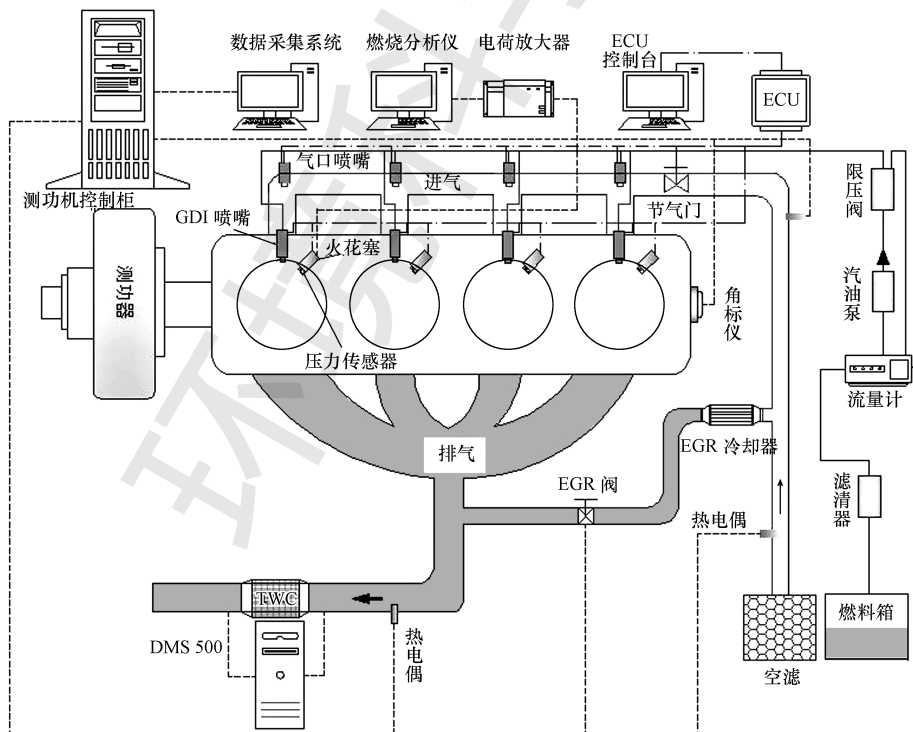


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic of the test devices

2.3.2 试验方法 为了研究发动机在实际运行时的排放情况,在不同燃料的测试过程中,未对发动

机做任何改动.根据该发动机的标定特点,其在冷启动(冷却液温度 $< 60 \text{ }^\circ\text{C}$) 时采用 PFI 模式,在暖机过

程后期(冷却液温度 $\geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时)运行 GDI 模式,而在完全暖机后(冷却液温度 $\geq 75\text{ }^{\circ}\text{C}$)则切换到的组合喷射(PFI+~50%GDI)模式.为了验证简化 PM 指

数在发动机不同运行条件下的适用性,本研究选取 4 种典型的发动机运行工况进行不同燃料的 PN 排放测试,试验的边界条件如表 3 所示.

表 3 试验的边界条件

Table 3 Operating conditions of the tests

序号	喷射模式	工况	转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	扭矩/Nm	冷却液温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	气口喷射	冷启动	1500	60	35 \pm 1
2	缸内直喷	暖机过程	1500	60	65 \pm 1
3	组合喷射(~50%直喷)	热态小负荷	1500	60	85 \pm 1
4	组合喷射(~50%直喷)	热态大负荷	3000	150	85 \pm 1

在试验过程中,首先进行 F1 在各工况下的测试试验.测试完成后,将油路中的燃料排空,加注 F2,将发动机在 $1500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的外特性工况下运行 15 min 以上以排尽管路中残存的 F1,然后进行 F2 在各工况下的测试试验.以此类推,依次完成 F1~F5 的测试试验.为了减少试验误差,按照此方法,重复 3 遍上述试验,将得到的有效数据取算术平均值作为发动机的 PN 排放结果.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 相关性分析结果

本研究对 20 种模型燃料的燃料参数与其对应的 PMI(本田模型)进行了相关性分析和显著性双尾 F 检验,结果如表 4 所示.从表 4 可以看出,有 7 个燃料参数在 0.05 水平上与 PMI 呈现出显著的相关关系.按照相关性由强到弱的排序,依次为: $T90 > T70 >$ 重芳烃含量 $> T95 > T50 >$ 终馏点温度 $>$ 烯烃含量.该结果意味着燃料的蒸馏参数 $T90$ 与 PM 排放呈现极强的线性相关关系,这与 Zhu 等(2017)的研究结果相一致.另外,关于 $T70$ 对 PM 影响的研究鲜有报道.本文的研究结果显示,在所有燃料参数中, $T70$ 也与 PMI 显著相关,其相关性仅略低于 $T90$.值得一提的是,以往关于燃料对汽油机颗粒物影响的研究对于 $T95$ 、 $T50$ 和终馏点等蒸馏参数关注较少. $T50$ 和 $T95$ 以及终馏点等馏程参数对燃料的蒸馏曲线形状影响较大,可表征燃料的挥发性.相关性分析结果显示,燃料的这些流程参数也与 PM 指数密切相关,值得深入研究并加以控制.

有许多文献(Karavalakis *et al.*, 2015; 王银辉等, 2016; 张超等, 2018)表明,芳香烃含量增加会导致发动机颗粒物排放增加.但是 Yao 等(2017)通过配制 5 种总芳烃和重芳烃含量不同组合的汽油,在 GDI 汽油机上测定了其 PN 排放.结果显示,PN

排放总是与重芳烃含量呈现一致的变化规律,而与总芳烃含量的变化趋势一致性较差.本研究结果验证了上述结论,即总芳烃与 PMI 的相关性却较弱($r=0.302$),而重芳烃(碳数 ≥ 9)与 PMI 具有显著的相关关系($r=0.877$).由此可见,芳香烃中的重质成分(碳数 ≥ 9)是决定芳香烃含量对 PM 排放影响的关键因素.另有文献(Hajbabaie *et al.*, 2013; 郑荣等, 2016)指出烯烃对 PM 排放具有一定影响,但其影响明显低于芳香烃.本研究结果也表明烯烃与 PMI 呈现出中等程度的相关性.

表 4 燃料参数与 PMI 的相关性及其显著性水平

Table 4 Correlation between fuel parameters and PMI and their significance level

燃料参数	单位	皮尔逊相关性(r)	显著性(p)	备注
$T90$	$^{\circ}\text{C}$	0.945	0.000	**
$T70$	$^{\circ}\text{C}$	0.894	0.000	**
重芳烃含量	%	0.877	0.000	**
$T95$	$^{\circ}\text{C}$	0.800	0.000	**
$T50$	$^{\circ}\text{C}$	0.707	0.000	**
终馏点温度	$^{\circ}\text{C}$	0.600	0.005	**
烯烃含量	%	-0.541	0.014	*
C/H	-	0.419	0.066	—
氧含量	%	-0.353	0.127	—
RVP	kPa	-0.308	0.186	—
总芳烃含量	%	0.302	0.195	—
初馏点温度	$^{\circ}\text{C}$	0.258	0.272	—
$T10$		-0.258	0.272	—
密度		0.256	0.277	—
RON		-0.153	0.521	—

注: * 在 0.05(双尾 F 检验)水平上相关性显著; ** 在 0.01(双尾 F 检验)水平上相关性显著.

3.2 简化 PM 指数模型

建立的多元线性回归模型的模型概述如表 4 所

示.从表 4 可以看出,模型 1 含有 7 个自变量,校正 $R^2=0.961$,标准误差为 0.107.采用“后退法”依次剔除了 T50、T95 和 T90 3 个自变量后,消除了自变量间的多重共线性,得到模型 4.

与模型 1 相比,模型 4 中仅含有烯烃、终馏点、重芳烃、T70 等 4 个自变量,模型维数降低,计算过程大为简化.但是模型的校正 R^2 反而从 0.961 增大到 0.962,标准误差也从 0.107 降为 0.105,模型的描述能力反而有所增强.另外,模型 4 的德宾-沃森统计量接近 2 ($DW = 1.919$),这说明模型的预测残差相互独立 (Ott *et al.*, 2015).因此,本文采用模型 4 作为最终的简化 PN 指数.

表 5 模型概述

Table 5 Model summary

模型	R^2	校正 R^2	标准误差限	德宾-沃森统计量
1	0.975	0.961	0.106705	
2	0.975	0.964	0.102854	
3	0.973	0.963	0.103798	
4	0.970	0.962	0.104832	1.919

注:因变量:PMI;模型 1 的预测变量:(常量),烯烃含量,T50,终馏点温度,重芳烃含量,T95,T70,T90;模型 2 的预测变量:(常量),烯烃含量,终馏点温度,重芳烃含量,T95,T70,T90;模型 3 的预测变量:(常量),烯烃含量,终馏点温度,重芳烃含量,T70,T90;模型 4 的预测变量:(常量),烯烃含量,终馏点温度,重芳烃含量,T70.

表 6 为模型 4 的方差分析结果.由表 5 可知,模型 4 的 F 统计量为 122.3,概率 p 值为 0.000.从表中还可以看到,模型 4 的残差平方和仅为回归平方和的 3.1%,这说明模型 4 中包含的燃料参数对 PM 指数具有决定性的影响.表 7 给出了模型的回归系数、共线性统计及显著性检验结果.由表 6 可知,模型的自变量 T70、重芳烃含量、终馏点温度和烯烃含量与因变量 PMI 的相关性均在 0.05 水平上具有统计学意义.在回归分析中,方差膨胀因子 (VIF) 越接近于 1 表示模型的自变量间的共线性越弱.一般地,当 $VIF < 5$ 时,可以认为模型的自变量间不存在明显的多重共线性 (郝黎仁, 2003).从表中可以看出,各个自变量的最大方差膨胀因子 (VIF) 为 $3.04 < 5$,说明模型 4 的自变量间不存在明显的共线性.

由表 7 的非标准化系数可知,简化 PM 指数指数的表达式可由式 (4) 来表示:

$$SPNI = 0.012 \times T70 + 0.048 \times HAC + 0.015 \times FBP - 0.034 \times OC - 2.721 \quad (4)$$

式中,SPNI 即为本研究建立的简化 PN 指数,是一个新的表征汽油燃料颗粒物排放潜势的指标,为无量纲数.T70 表示蒸发 70% 体积的燃料对应的蒸馏温度 ($^{\circ}C$).HAC 和 OC 分别表示燃料中的重芳烃 (碳数 ≥ 9) 和烯烃的体积百分比.FBP 表示燃料的终馏点温度 ($^{\circ}C$).

表 6 方差分析

Table 6 Analysis of variance

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性
4 回归	5.376	4	1.344	122.3	0.000
残差	0.165	15	0.011		
总计	5.541	19			

表 7 回归系数

Table 7 Regression coefficients

模型	非标准化系数			共线性统计	
	B	标准误差	显著性	容差	VIF
4 (常量)	-2.721	0.832	0.005		
T70	0.012	0.002	0.000	0.329	3.04
重芳烃含量	0.048	0.007	0.000	0.373	2.68
终馏点温度	0.015	0.004	0.002	0.693	1.44
烯烃含量	-0.034	0.013	0.017	0.602	1.66

3.3 回归方法的检验

表 8 显示的是被排除变量的重检验结果.从表 8 中可以看出,T50、T95 和 T90 这 3 个燃料参数的 t 检验 p 值均大于 0.1.所以“无效假设”成立,这些变量被排除出了回归模型以外 (庄楚强等, 2013).图 2a 所示为回归标准化残差的频率分布直方图.从图 2a 中可以看出,模型 4 的回归标准化残差的频率呈现出正态分布特征.图 2b 展示出了模型 4 的回归标准化正态 P-P 图,可以看到回归标准化残差的散点分布靠近一条直线,说明模型 4 满足正态性假设.综上所述,本研究建立的模型满足回归分析的所有假设,具有统计学意义.

表 8 排除的变量

Table 8 The excluded Variables

模型	输入 Beta	t	显著性	偏相关	共线性统计		
					容差	VIF	最小容差
T50	-0.03	-0.38	0.71	-0.10	0.34	3.0	0.20
4 T95	-0.011	-0.12	0.90	-0.03	0.25	4.0	0.25
T90	-0.201	1.14	0.27	0.29	0.06	16.0	0.06

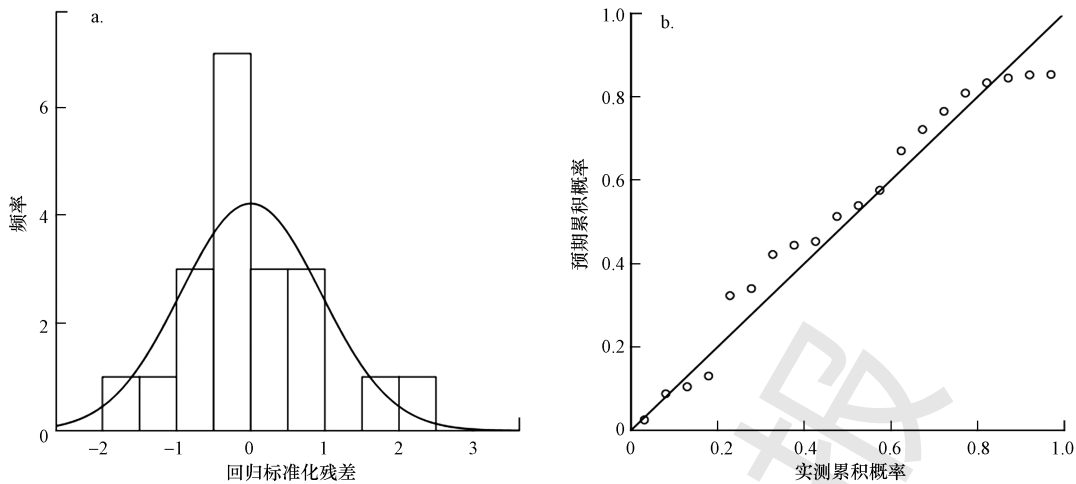


图2 回归标准化残差频率分布直方图(a)及回归标准化残差的正态 P-P 图(b)

Fig.2 Frequency distribution histogram of regression normalized residual(a) and normal P-P diagram of regression normalized residual(b)

图3为简化PN指数(SPNI)与详细PM指数(PMI)的对比关系.由图可知,本文建立的4参数(T70、重芳烃含量、终馏点温度、烯烃含量)简化PN指数与详细PM指数呈现高度的线性关系,决定系数 R^2 高达0.971.这说明SPNI与PMI的预测结果具有很好的一致性.因此,该简化PN指数(SPNI)在理论上可以替代计算复杂的详细PM指数用于工程计算,而不会过多地影响模型的预测精度.

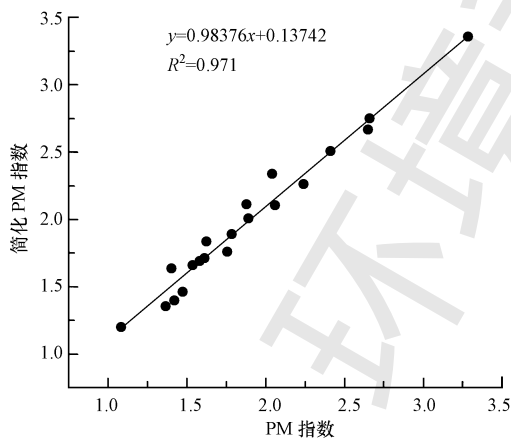


图3 简化PN指数(SPNI)与详细PM指数(PMI)的关系

Fig.3 Relationship between simplified PN index (SPNI) and the detailed PM index (PMI)

3.4 发动机试验验证结果

3.4.1 气口喷射模式 图4a为气口喷射模式(工况1)下PN排放与简化PM指数的关系.由图可知,不同燃料的PN排放与SPNI呈较为显著的线性关系,决定系数 R^2 为0.917.这是因为该工况虽然采用气口喷射方式,但是由于机体温度较低,燃料的蒸

发速率较慢,燃烧室内仍然存在局部油气混合不均导致的高当量比区域.燃料在该区域的缺氧扩散燃烧会产生较多颗粒物(Shuai *et al.*, 2018).而SPNI高的燃料,其重质成分多,挥发性较差,会加剧这一现象.因此,在该模式下,汽油的燃料特性对发动机PN排放的影响较为显著,SPNI可以预测汽油机燃用不同燃料的PN排放趋势.

3.4.2 缸内直喷模式 图4b给出了缸内直喷模式(工况2)下PN排放与简化PN指数的关系.图4b显示简化PN指数对该工况下的PN排放的决定系数 R^2 高达0.940,二者呈现高度的线性相关关系.这说明缸内直喷模式下汽油机燃用不同燃料的PN排放与SPNI具有高度的一致性.

在该模式下,由于采用缸内直喷,燃烧室内局部油气混合不均和燃油湿壁现象同时存在.而此时发动机冷却液温度仅为65℃左右,尚未完全达到热机状态,局部浓区的缺氧燃烧和附壁油膜的扩散燃烧会产生大量颗粒物.所以,与气口喷射模式相比,同一燃料在该工况的PN排放增加了1.5~2.7倍.SPNI高的燃料,其油气混合速率和油膜蒸发速率均劣于SPNI低的燃料,在燃烧过程中会产生更多的颗粒物.

3.4.3 组合喷射小负荷工况 图5a所示为组合喷射小负荷工况下PN排放与简化PN指数的关系.由图5a可知,不同燃料在热态小负荷工况下的PN排放仍然与SPNI的变化趋势相一致.但是与其它工况相比,SPNI在该工况下对PN的决定系数略有降低($R^2=0.826$).

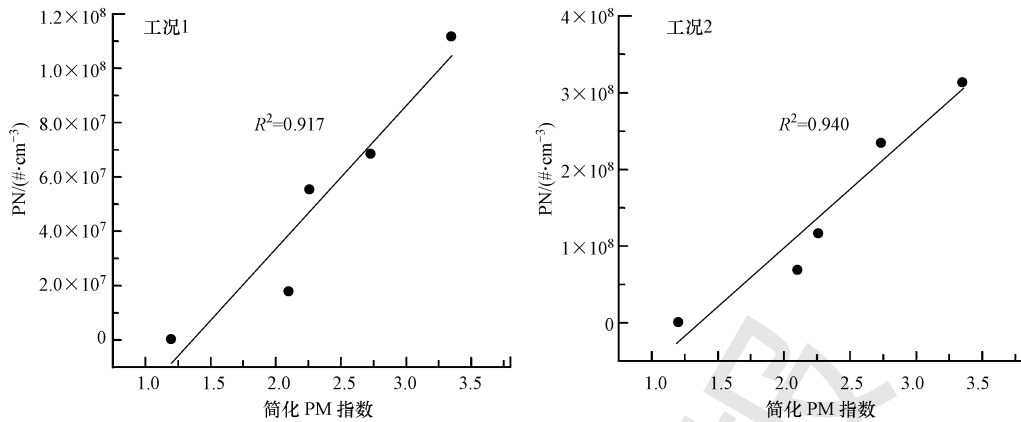


图4 气口喷射模式下(a)和缸内直喷模式下(b)PN排放与简化PN指数的关系

Fig.4 Relationship between PN emission and simplified PN index in port fuel (a) and gasoline direct injection (b) mode

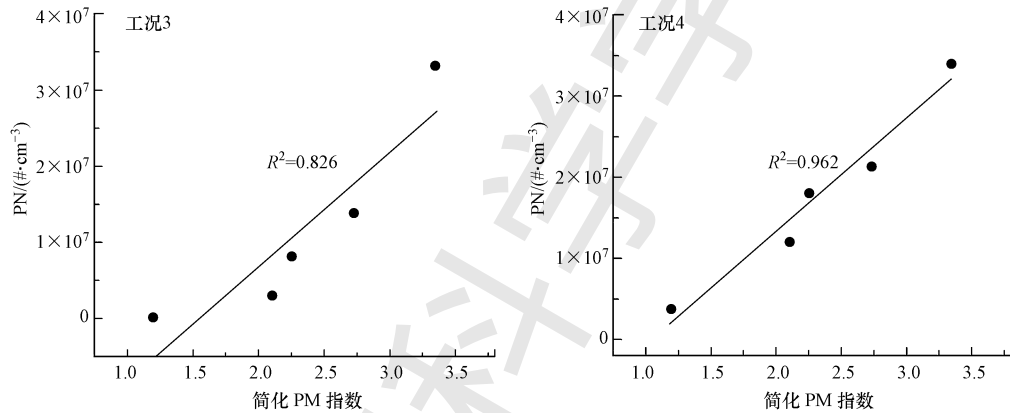


图5 组合喷射小负荷(a)及大负荷(b)工况下PN排放与简化PN指数的关系

Fig.5 Relationship between PN emission and the simplified PN index in compound injection light (a) and heavy (b) load mode

在该工况下,燃料特性对PN影响减弱主要有以下两方面因素.首先,该模式发动机喷油切换为组合喷射模式(直喷比例约50%),直喷燃料量降低,油气混合时间变长,混合气趋向均匀.其次,该工况处于完全热机状态,发动机机体温度较高,燃料的蒸发速度加快,导致油膜扩散燃烧的可能性降低.另外,该工况下各燃料的总体PN排放量处于较低水平,这造成仪器测量结果的信噪比降低.以上因素共同作用导致SPNI在该工况下的预测精度有所降低.但是SPNI仍然可以预测出该工况不同燃料PN排放的变化趋势.

3.4.4 组合喷射大负荷工况 图5b给出了组合喷射大负荷(工况4)工况下PN排放与简化PN指数的对应关系.由图5b可知,该工况下的PN排放与SPNI呈现显著的线性相关,决定系数 R^2 高达0.962.与工况3($R^2=0.826$)相比,SPNI模型在该工况的预

测精度明显提高.这主要是因为在大负荷工况,为了足够的功率输出,发动机采用混合气加浓策略,缸内局部缺氧现象严重,增大了燃料扩散燃烧的可能性,燃料特性的影响被凸显出来.

4 结论(Conclusions)

1) 汽油机的颗粒物排放与其燃料组分和挥发性参数密切相关.按照相关性由强到弱的燃料参数排序如下: $T_{90}>T_{70}>$ 重芳烃含量 $>T_{95}>T_{50}>$ 终馏点温度 $>$ 烯烃含量.

2) 建立的包含4个燃料参数(T_{70} 、重芳烃含量、终馏点温度和烯烃含量)的简化PN指数经检验具有显著的统计学意义.

3) 在各种典型运行模式下发动机的实际PN排放均与该简化PN指数呈现显著的线性相关关系.

4) 发动机的机体温度越低,直接喷射油量越

大,燃料对发动机 PM 排放的影响越显著.

5)与现有的详细 PM 指数相比,SPNI 关系式计算简便,可操作性强,可用作评估汽油机(包括 PFI、GDI 或组合喷射)燃用不同燃料时的 PN 排放趋势.

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):

- Aikawa K, Jetter J J. 2014. Impact of gasoline composition on particulate matter emissions from a direct-injection gasoline engine: Applicability of the particulate matter index[J]. *International Journal of Engine Research*, 15: 298-306
- Aikawa K, Sakurai T, Jetter J J. 2010. Development of a predictive model for gasoline vehicle particulate matter emissions [J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 3: 610-622
- Amara A B, Tahtouh T, Ubrich E, *et al.* 2018. Critical analysis of PM index and other fuel indices: impact of gasoline fuel volatility and chemical composition[R]. *SAE Technical Paper*
- Chapman E, Winston-Galant M, Geng P, *et al.* 2016. Alternative fuel property correlations to the Honda Particulate Matter Index (PMI) [R]. *SAE Technical Paper*
- Chen L, Zhang Z, Gong W, *et al.* 2015. Quantifying the effects of fuel compositions on GDI-derived particle emissions using the optimal mixture design of experiments[J]. *Fuel*, 154: 252-260
- Cho J, Si W, Jang W, *et al.* 2015. Impact of intermediate ethanol blends on particulate matter emission from a spark ignition direct injection (SIDI) engine[J]. *Applied Energy*, 160: 592-602
- 付秉正, 杨正军, 尹航, 等. 2017. 轻型汽油车实际行驶污染物排放特性的研究[J]. *汽车工程*, 39: 376-380
- 郝黎仁. 2003. SPSS 实用统计分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社
- Hajbabaei M, Karavalakis G, Miller J W, *et al.* 2013. Impact of olefin content on criteria and toxic emissions from modern gasoline vehicles [J]. *Fuel*, 107: 671-679
- Karavalakis G, Short D, Vu D, *et al.* 2015. Evaluating the effects of aromatics content in gasoline on gaseous and particulate matter emissions from SI-PFI and SIDI vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 49(11): 7021-7031
- Kufferath A, Berns S, Hammer J, *et al.* 2012. The EU6 Challenge at GDI - Assessment of Feasible System Solutions[M]. na
- Leach F, Stone R, Fennell D, *et al.* 2017. Predicting the particulate matter emissions from spray-guided gasoline direct-injection spark ignition engines [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 231(6): 717-730
- Ott R L, Longnecker M T. 2015. An introduction to statistical methods and data analysis[M]. Nelson Education
- 帅石金, 董哲林, 郑荣, 等. 2016. 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*, 34(2): 105-116
- Shuai S, Ma X, Li Y, *et al.* 2018. Recent progress in automotive gasoline direct injection engine technology [J]. *Automotive Innovation*, 1(2): 1-19
- Sobotowski R A, Butler A D, Guerra Z. 2015. A pilot study of fuel impacts on pm emissions from light-duty gasoline vehicles[J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 8(1): 214-233
- SPSS Inc. 2005. SPSS Base 14.0 user's guide[M]. Prentice Hall
- 王银辉, 帅石金, 张文彬, 等. 2016. 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*, 7(4): 355-370
- Yinhui W, Rong Z, Yanhong Q, *et al.* 2016. The impact of fuel compositions on the particulate emissions of direct injection gasoline engine[J]. *Fuel*, 166: 543-552
- Yao C, Dou Z, Wang B, *et al.* 2017. Experimental study of the effect of heavy aromatics on the characteristics of combustion and ultrafine particle in DISI engine[J]. *Fuel*, 203: 290-297
- 张超, 夏淳, 方俊华, 等. 2018. 汽油芳香烃含量对颗粒物排放及其微观理化特性的影响[J]. *内燃机工程*, 39: 8-14
- 庄楚强, 何春雄. 2013. 应用数理统计基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社
- Zhu R, Hu J, Bao X, *et al.* 2017. Effects of aromatics, olefins and distillation temperatures (T50 & T90) on particle mass and number emissions from gasoline direct injection (GDI) vehicles[J]. *Energy Policy*, 101: 185-193
- 郑荣, 李梦仁, 王银辉, 等. 2016. 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*, 34(1): 32-40