

国六重型柴油车挥发性有机物排放特性

刘希瑞,郭冬冬*,李家琛,葛蕴珊,谭建伟,吕立群 (北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081)

摘要: 选取 5 辆典型国六重型柴油车,进行基于 C-WTVC 的挥发性有机物(VOCs)排放测试,分析了包括 7 种苯系物以及 14 种醛酮类物质的比排放量。结果表明,甲苯、苯、苯乙烯是国六重型柴油车苯系物排放的主体物质,占总量的 60%~86%;而甲醛、乙醛、苯甲醛是醛酮类物质的主要物质,占总量的 72%~87%。在同时包含市区、市郊和高速综合工况的试验车会产生较高的苯系物和醛酮类物质的排放,苯、苯乙烯在综合工况下的比排放量分别为处于市郊工况车型的 1.25 倍、1.45 倍,市区占比为 40%的货车具有最高的甲醛比排放量 20.84mg/(kW·h),有超甲醇车甲醛排放限值的风险;在市郊工况下车型的甲苯、乙醛排放平均分别为其余车型的 1.65 倍、2.1 倍。测试车辆的臭氧潜势均值达到(249.53±10)mgO₃/(kW·h)。

关键词: 挥发性有机物; 苯系物; 醛酮类; 国六重型柴油车

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)07-3131-07

Emission characteristics of volatile organic compounds from heavy duty diesel vehicles. LIU Xi-rui, GUO Dong-dong*, LI Jia-chen, GE Yun-shan, TAN Jian-wei, LÜ Li-qun (School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China). *China Environmental Science*, 2021,41(7): 3131~3137

Abstract: Five heavy duty diesel vehicles were selected for C-WTVC cycle test. Volatile organic compounds (VOCs), including 7 benzene series compounds and 14 aldehydes and ketones, were collected under the whole cycle. The results showed that toluene, benzene and styrene were the main pollutants of benzene series emissions from national six heavy duty diesel vehicles, accounting for 60% ~ 86% of the total; while formaldehyde, acetaldehyde and benzaldehyde were the main pollutants of aldehydes and ketones, accounting for 72% ~ 87% of the total. The specific emissions of benzene and styrene were 1.25 and 1.45 times of those in suburban driving mode respectively. The truck with 40% of urban area has the highest specific formaldehyde emission of 20.84mg/(kW·h). The emission of toluene and acetaldehyde is 1.65 and 2.1 times higher than that of other vehicles under suburban conditions. The average ozone potential of the vehicle is (249.53 ± 10) mgO₃/(kW·h).

Key words: VOCs; benzene series; aldehydes and ketones; heavy-duty diesel vehicles

研究表明,挥发性有机物(VOCs)中如苯、甲苯、乙苯和二甲苯以及醛类物质都会对人体的健康产生较大的影响(如刺激性、致癌性、致突变性和致畸性)^[1-2]。柴油机动车醛类、酮类、单环芳香烃、多环芳烃等污染物的排放水平较高^[3-4]。芳烃和醛酮类物质在实际道路 VOCs 排放中占较大比例^[5],且两者的比排放量水平都较高^[6-7]。同时,VOCs 物质种类繁多,对于不同油品和工况下差异较大^[8],燃料中乙醇浓度增加会导致醛类排放升高和芳香烃、戊烷排放降低^[9],而使用生物柴油会造成甲醛、乙醛、乙醇和正丁烷的排放增加,甲烷排放减少^[10]。但这都是基于掺混燃料以及实际道路的非常规研究,对于在实验室标准工况下燃用市售燃油的柴油车非常规排放水平鲜有研究。

实验室测试循环工况对于车辆的排放水平具有标定意义,能准确反应试验车辆的排放水平^[11]。为探究燃用市售标准柴油的国六重型车非常规污染

物排放水平,对 5 辆满足国六排放的重型柴油车在燃用国六标准市售油的条件下(包括货车和自卸车)进行了实验室 C-WTVC 循环测试,测试 VOCs 物质中 7 种苯系物以及 14 种醛酮类物质,对苯系物与醛酮类物质进行定性定量分析,旨在获得国六重型车非常规污染物的排放特性,为非常规污染物的控制提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验车辆及设备

选取 5 辆满足国六排放标准的典型重型柴油车,基本信息如表 1 所示,3 辆重型货车由于使用场景不同而有不同的工况占比,自卸车则为纯市郊工况。所选取车辆均采用氧化催化器(DOC)+催化型颗粒物

收稿日期: 2020-12-15

基金项目: 北京市科技委员会项目(Z181100005418012)

* 责任作者, 博士, guo_dongg@126.com

捕集器(cDPF)+选择性催化还原器(SCR)+氨逃逸催化器(ASC)的柴油机排气后处理路线。

表 1 试验车辆基本信息
Table 1 Basic information of test vehicle

车辆 编号	车辆 类型	额定功 率(kW)	最大质 量(kg)	行驶里 程(km)	各工况占比		
					市区(%)	市郊(%)	高速(%)
I	货车	93	4200	3564	40	40	20
II	自卸车	151	18000	1866	0	100	0
III	货车	162	14060	338	10	40	50
IV	货车	257	31000	1386	10	30	60
V	自卸车	279	25000	15102	0	100	0

所有测试均在热机状态进行,设备主要包括德国 MAHA 公司生产的滚筒直径为 1.828m、前后轴距可调的商用车四驱底盘测功机,日本 HORIBA 公司生产的全流定容稀释采样系统(CVS)采用日本 HORIBA 公司生产的 MEXA-7000nt 进行常规污染物 HC、CO、CO₂、NO_x的分析处理。

1.2 非常规污染物采样及分析方法

对于非常规污染物苯系物及醛酮类物质,采样口于常规分析仪下游,在 CVS 系统的稀释通道中利用采样泵进行全程采集.CVS 系统稀释后的非常规污染物浓度较低,参照美国环境保护署制定的 TO-11A 技术规范^[12-13],利用 Tenax TA 管和 LpDNPH S10 型硅胶采样管分别进行苯系物和醛酮类物质的采样.非常规排气污染物整体采样系统如图 1 所示。

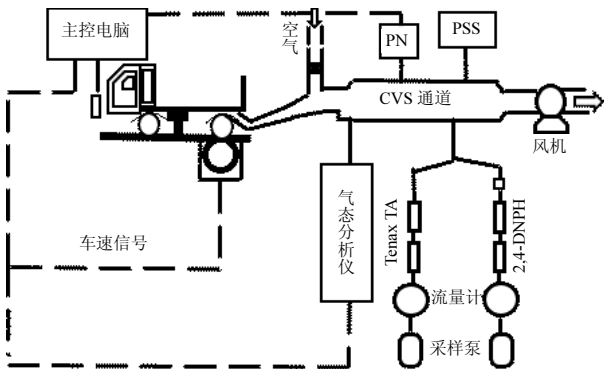


图 1 重型车底盘测功机采样系统示意

Fig.1 Schematic diagram of heavy vehicle chassis dynamometer sampling system

1.2.1 C-WTVC 工况 试验所用的工况是根据世界重型商用车瞬态循环调整过加速度和减速度形成的适合中国的重型车商用瞬态循环工况^[14](C-

WTVC),如图 2 所示.本研究中底盘测功机的行驶阻力设置为推荐道路行驶阻力,车辆载荷为空载。

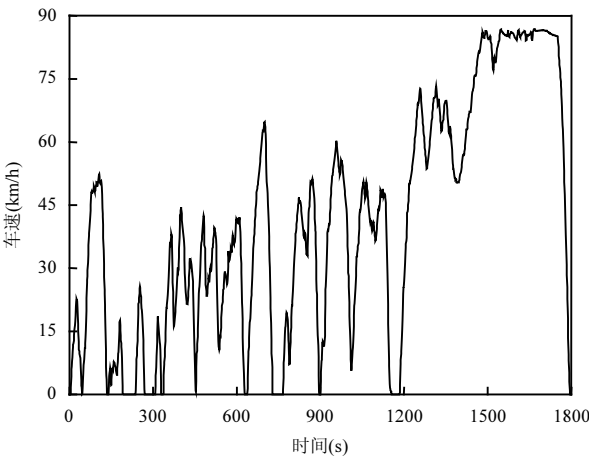


图 2 C-WTVC 循环工况

Fig.2 C-WTVC cycle

1.2.2 苯系物采样及分析方法 利用 2 根串联的 Tenax TA 吸附管对苯系物进行采集,该管的主要成分为 Tenax TA(2,6-二甲基对苯醚)吸附剂,这是一种多孔的高分子聚合物,因为其稳定性较高、抗氧化性强且不易受湿度的影响,故常用于烃类化合物的采集^[15],试验时,将 2 根 Tenax TA 管串联在采样泵的上游,采样流量 0.5L/min,进行车辆整个循环工况 30min 的采集,样品进行密封遮光并于 4℃以下冰箱中冷藏保存,7d 内完成分析.样品分析采用 UNITY 全自动脱附仪将管内污染物释放出来,然后利用美国 Agilent 公司生产的气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)进行定性定量分析,表 2 为本次 GC-MS 分析仪的参数设置。

表 2 二次热解析-气相色谱/质谱联用仪的参数设置

Table 2 Parameter setting of secondary thermal desorption gas chromatography mass spectrometry

项目	参数
热解析(TD)	脱附温度 280℃(5min),低温吹扫 1min,柱头压 58.6kPa
	分流比 75:1,冷阱升温程序-10℃—40℃/s—280℃
	(3min)
气相色谱(GC)	色谱柱型号 HP-5MS,色谱柱尺寸 30m×0.25mm×0.25μm
	载气氮气(99.99%),柱流量 1mL/min
	升温程序 35℃(5min)—5℃/min—280℃(10min)
质谱(MS)	传输线温度 280℃,离子源电子轰击能量(EI)70eV,离子源温度 200℃
	溶剂延迟时间 2min,扫描模式 SIM,扫描范围 35~550amu
	电子倍增器电压 1.0kV,NIST05 谱库检索

1.2.3 醛酮类物质采样及分析方法 对于醛酮类化合物的采样,主要通过串联两根美国 SUPELCO 公司生产的 LpDNPH S10 型硅胶采样管以及在采样管前串联的臭氧过滤器防止臭氧氧化吸附剂,采样流量 0.6L/min,采样时长 30min,利用采样管有效成分 2,4-二硝基苯肼(2,4-DNPH)与小分子量的醛酮化合物反应生成稳定的腙类化合物的性质进行固体吸附,采样完成进行遮光密封并在 4℃ 以下冷藏保存^[12-13,15].采用乙腈为洗脱剂,利用固相萃取法将管内的腙类衍生物洗脱出来,洗脱液采用美国 Agilent 公司的高效液相色谱仪(HPLC)进行定性定量分析.

1.3 计算方法

1.3.1 非常规污染物比排放量计算 基于整个 C-WTVC 循环的循环功计算非常规污染物比排放量,循环功计算如公式(1)所示.

$$W = \int_1^r \frac{n \times T}{9550} \quad (1)$$

式中: W 为车辆进行一次 C-WTVC 循环的循环功, kW·h; n 为发动机转速,r/min; T 为发动机扭矩,N·m; t 为试验时间,s.

按照公式(2)计算整个试验循环中非常规污染物排放总质量.

$$m_j = \frac{V_{ed}}{V_{pump}} \times k \times m_{cor,j} \quad (2)$$

式中: m_j 为整个循环污染物排放质量,mg; V_{ed} 为总稀释排气体积,L; V_{pump} 为采样体积,L; k 为分析仪取样系数,对于苯系物,热脱附后有 1/2.7 进入分析仪称重,则其系数 k 为 2.7;对于醛酮类物质,洗脱时定容为 5mL,而分析仪取样为 25μL,则其系数 k 为 200; $m_{cor,j}$ 为非常规污染物分析仪分析结果,mg.

以功为基准的非常规污染物比排放量,按照公式(3)计算.

$$EF_{pow,j} = \frac{m_j}{W} \quad (3)$$

式中: $EF_{pow,j}$ 为非常规各污染物比排放量,mg/(kW·h); m_j 为整个循环污染物排放质量,mg; W 为整个 C-WTVC 循环发动机所做的功,kW·h.

1.3.2 臭氧生成潜势(OFP)计算模型 基于以碳氢为主的臭氧潜势,选用最大叠加活性法(MIR)的 OFP 计算方法^[16].该方法是基于汽车尾气中所排出的醛酮污染物和苯系物成分的最大反应活性,将不同物质的反应活性叠加来表征污染物引起二次臭氧合

成的潜在能力,如公式 4 所示.

$$OFP = \sum MIR_j \times EF_{pow,j} \quad (4)$$

式中: OFP 是计算得到的臭氧生成潜势,mgO₃/(kW·h); MIR_j 是组分在臭氧合成反应中的最大反应活性,通过化学反应活性测定^[17],本文所涉及物质的 MIR 列于表 3, $EF_{pow,j}$ 为组分 j 的比排放量,mg/(kW·h).

表 3 部分 VOC 物质的 MIR 值
Table 3 The MIR values of some VOCs

物质名	MIR 值	物质名	MIR 值	物质名	MIR 值
苯	0.42	甲苯	2.73	乙苯	2.70
二甲苯	2.70	甲醛	7.20	苯乙烯	2.20
苯甲醛	-0.57	乙醛	5.50	丙醛	6.53
四碳酮	1.18	丙酮	0.56	丁酮	1.18
对二甲苯	6.60	邻二甲苯	6.50	间二甲苯	8.20

2 结果与讨论

2.1 非常规污染物排放特性

共分析了 7 种苯系物,14 种醛酮类物质,表 4 为各样车苯系物和醛酮化合物总比排放量.

表 4 样车非常规污染物比排放量[mg/(kW·h)]
Table 4 The specific VOCs emissions[mg/(kW·h)]

物质	I 车	II 车	III 车	IV 车	V 车
苯系物	39.34	48.66	53.71	18.93	21.00
醛酮类	34.48	59.78	19.20	26.04	24.42

样车中 I 车的市区工况占比最高(I 车市区工况占比为 40%)、车型整备质量最小,其非常规污染物比排放量仅次于 II 车,处于样车中较高水平;对比 I 车与 III 车、IV 车(三者市区工况的比例分别为 40%、10%、10%),可见市区占比越高其非常规污染物比排放量越高,综合车型级别的差异,可知同级别车型市区工况占比越高其非常规污染物排放会越恶劣.由于挥发性有机物主要来源于未燃燃料,很大程度上取决于发动机燃烧状态^[7],市区工况处于 C-WTVC 循环前 600s,在该段工况下车辆频繁启停,车速低且加速度变化剧烈,导致柴油机负载频繁变换、燃烧不充分,且此时排气温度始终较低,后处理器长期处于起燃点附近,氧化转化能力不足,为苯系物和醛酮的生成提供条件,这与其他学者发现的低速段的非常规污染物排放会远高于高速段的结论相似^[7,18-19].

2.2 苯系物各物质排放特性

2.2.1 苯系物各物质比排放量及占比 表 5 中,二甲苯为间二甲苯、邻二甲苯、对二甲苯 3 种污染物的总量。

表 5 苯系物各物质比排放量[mg/(kW·h)]
Table 5 The specific benzene series emissions [mg/(kW·h)]

物质名称	I 车	II 车	III 车	IV 车	V 车
乙苯	3.18	2.22	4.32	1.75	1.24
二甲苯	8.46	4.55	9.94	5.93	3.12
苯	10.07	4.77	7.15	3.53	4.37
苯乙烯	10.79	4.93	9.35	3.17	3.68
甲苯	6.85	32.2	22.95	4.55	8.59
总量	39.34	48.66	53.71	18.93	21

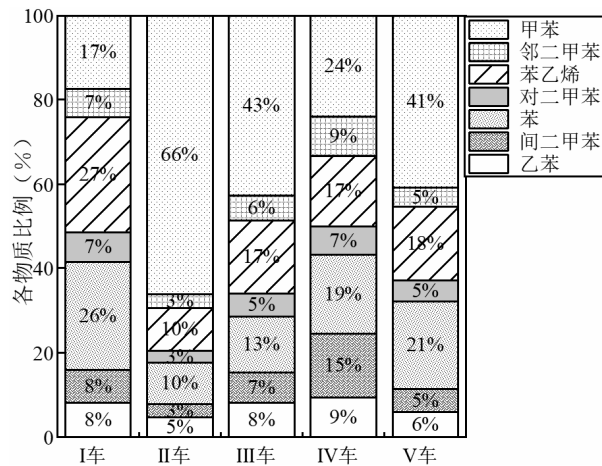


图 3 苯系物各物质质量占比
Fig.3 The proportion of benzene series

如图 3,样车排放的苯系物中占比最高的是甲苯、苯、苯乙烯(三者最高比排放量分别达 32.20, 10.07,10.79mg/(kW·h)),该 3 种物质比排放量之和占试验车苯系物总比排放量的 60%~86%,其余物质占比和比排放量较低,可见重型车排放的苯系物以甲苯、苯、苯乙烯 3 种物质为主.市郊稳态工况下,甲苯在苯系物的排放中占比较高,其中 II 车和 V 车市郊工况占比均为 100%,II 车甲苯的排放量占该车苯系物排放总量的 66%,V 车甲苯的排放占其苯系物总排放的 41%.通过对比 I 车、III 车、IV 车(三者市区工况占比分别为 40%、10%、10%),发现随着市区工况占比的下降,试验车甲苯排放占比上升;反之,会造成苯和苯乙烯排放占比上升(其中,苯的排放占比平均上升了约 70%,苯乙烯排

放占比上升了约 60%).推测是由于样车在 C-WTVC 市区工况下时,车速低导致发动机排气空速较小,除了生成甲苯外,在排气管及缸内有足够的时间进一步生成二甲苯等复杂产物,同理,在市郊及高速等高车速时,此时发动机处于高空速下,生成的苯系物不足以继续反应生成更多的除甲苯以外的复杂产物。

国六重型车苯系物排放主要以甲苯、苯、苯乙烯为主,随着市区工况占比的增加,苯和苯乙烯的排放占比呈上升趋势,而甲苯的排放占比则呈下降趋势。

2.2.2 苯系物重点物质排放特性 由图 4 可知,在排放量较高的 3 种苯系物中,甲苯为苯系物中单个物质比排放量最高,其中 II 车甲苯的比排放量达 32.20mg/(kW·h).通过对比发动机功率及最大质量相近的车型(II 车和 III 车、IV 车和 V 车,其中,II 车和 V 车市郊占比均为 100%)发现,II 车甲苯的比排放量为 III 车的 1.41 倍,V 车甲苯的比排放量为 IV 车的 1.89 倍,说明甲苯的排放量会随着市郊稳态工况的增多而明显增加;对于苯与苯乙烯,IV 车苯和苯乙烯的比排放量与 V 车相近,III 车苯和苯乙烯的比排放量分别为 II 车的 1.5 倍、1.9 倍,说明相近车型中处于稳态工况的 II 车和 V 车相对于工况更复杂的 III 车和 IV 车会产生更低的苯及苯乙烯排放.较为明显的现象是 I 车苯与苯乙烯的比排放量分别为 10.07 和 10.79mg/(kW·h),为本研究中最(其市区工况占比为 40%),说明发动机负载频繁变动的市区工况会产生大量苯和苯乙烯排放。

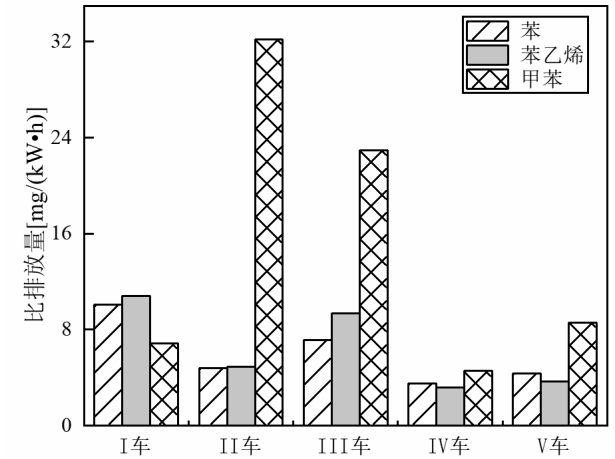


图 4 苯系物重点物质比排放量车
Fig.4 The specific key benzene series emissions

2.3 醛酮类各物质排放特性

2.3.1 醛酮类各物质比排放量及占比 由于乙醛、丁烯醛、丁酮、戊醛、环己酮 5 种醛酮类物质排放质量为 0,故未在表 6 中给出。

表 6 醛酮类各物质比排放量[(mg/kW·h)]
Table 6 The specific aldehydes and ketones emissions[(mg/kW·h)]

物质名称	I 车	II 车	III 车	IV 车	V 车
甲醛	20.84	5.14	2.34	8.55	2.83
乙醛	6.17	30.33	10.06	8.27	10.96
丙烯醛+丙酮	0	9.02	2.72	1.9	1.85
丙醛	0.8	0.67	0	0.41	1.59
甲基丙烯醛	0	1.97	0.82	0.56	0.84
丁醛	3.56	0	0	0.84	2.74
苯甲醛	3.11	9.36	2.56	4.02	3.61
甲基苯甲醛	0	3.29	0.7	1.49	0
总量	34.48	59.78	19.2	26.04	24.42

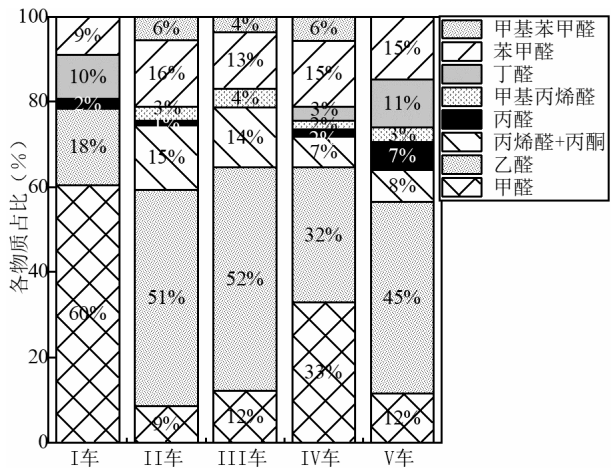


图 5 醛酮类各物质质量占比
Fig.5 The proportion of aldehydes and ketones

由图 5 可知,样车排放的醛酮类污染物以甲醛、乙醛和苯甲醛为主(该 3 种污染物最大比排放量分别为 20.84,30.33,9.36mg/(kW·h)),这 3 种污染物的排放质量占醛酮类总排放质量的 72%~87%。苯甲醛的排放占比稳定在 15%左右;处于纯市郊工况的 II 车与 V 车乙醛排放分别为 51%、45%,(二者市郊工况占比均为 100%),市区工况占比最高的 I 车乙醛的排放占比为 18%,忽略车型之间的差异,说明市区工况占比高的试验车乙醛排放占比较低;III 车的甲醛占比为 II 车的 1.3 倍,IV 车的甲醛占比为 V 车的 2.75 倍,I 车甲醛的排放占比为本研究最高的 60%,推测是因为处于市区工况下的车辆频繁启动且负荷较低,

此时发动机缸内燃烧温度较低,雾化及氧化不充分,而甲醛恰是低温下不完全氧化的产物,此时的缸内燃烧情况为甲醛的产生提供了条件,同时,在市区工况下,DOC 的载体温度较低,其氧化能力不足,也导致甲醛占比的上升,说明市区工况占比的增加会促进甲醛排放占比的上升,反之乙醛排放占比上升。

2.3.2 醛酮类重点污染物排放特性 根据图 6,乙醛为试验车辆醛酮类比排放量最高的物质,其最高比排放量达 30.33mg/(kW·h),II 车乙醛的比排放量为 III 车 3.1 倍,V 车乙醛的比排放量是 IV 车的 1.1 倍,说明市郊稳态工况占比的增加(II 车、V 车的市郊工况占比均为 100%)会导致乙醛比排放量的上升;苯甲醛的排放特性与乙醛类似,即市郊工况占比越多其苯甲醛的比排放量越高;I 车甲醛的比排放量为本研究中最高的 20.8mg/(kW·h)(I 车市区工况占比为五辆车中最高的 40%),而新发布的燃用甲醇的重型车甲醛排放限值为 20mg/(kW·h)^[20],则市区工况会有甲醛超标的风险.因此,市区工况会更容易产生甲醛的排放且有超标风险,市郊工况更容易产生乙醛和苯甲醛的排放。

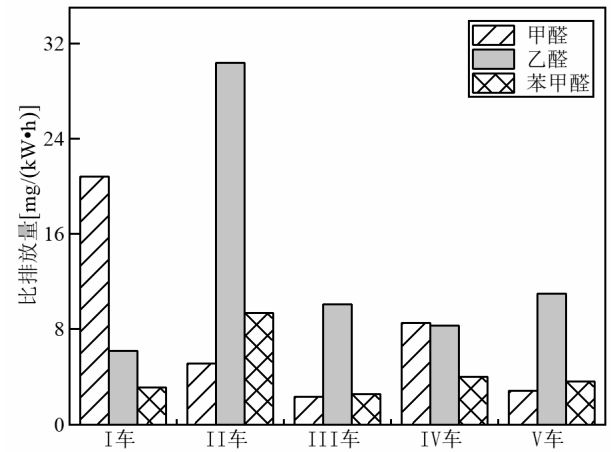


图 6 醛酮类重点物质比排放量
Fig.6 The specific key aldehydes and ketones emissions

2.4 与其他结果的对比

根据公式(5)可得基于公里数的比排放量。

$$EF_{dis,j} = \frac{m_j}{S} \tag{5}$$

式中:EF_{dis,j} 为非常规各污染物排放因子,mg/km;m_j 为整个循环污染物排放质量,mg;S 为整个 C-WTVC 循环车辆所行驶的里程,km。

表 7 与其他研究的数据对比(mg/km)
Table 7 Data comparison with other studies(mg/km)

来源	研究对象	污染物	排放因子
本研究	I 车	7 种 VOCs	24.02
		14 种醛酮	
	II 车	7 种 VOCs	128.12
		14 种醛酮	
	III 车	7 种 VOCs	63.35
		14 种醛酮	
	IV 车	7 种 VOCs	83.64
		14 种醛酮	
	V 车	7 种 VOCs	69.78
		14 种醛酮	
[6]	轻型柴油车	30 种 VOCs	163.80
[19]	重型柴油车	64 种 VOCs	80.42±36.10
[18]	重型柴油车	23 种醛酮	69.67
[7]	重型柴油车	10 种醛酮	138.93

表 7 表明,本研究测试结果数量级与之前学者一致.除 II 车之外,测试结果低于之前,这是由于本次试验车辆均满足国六标准且燃用国六标准燃油,国六法规中增加了冷启动要求且对于车辆低温下后处理活性标定等更加严格,这也是造成包含市区工况车辆的非常规排放低于前者结果的主要原因.

2.5 臭氧生成潜势

根据最大叠加活性法计算出样车苯系物和醛酮类物质的臭氧生成潜势,如图 7 所示.

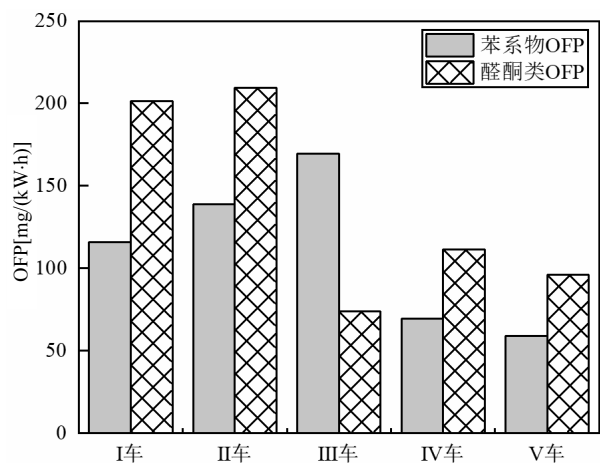


图 7 样车臭氧生成潜势对比

Fig.7 Comparison of ozone generation potential of vehicles

由图 7 可见,本次生成的非常规有机物很大程度上促进了 O_3 生成,平均臭氧生成潜势(OFP)达到 $(249.53 \pm 10) \text{ mgO}_3/(\text{kW} \cdot \text{h})$.当苯系物和醛酮类物质比排放量数值相近时,醛酮类 OFP 远高于苯系物 OFP,说明醛酮类物质是 OFP 的贡献主体;处于复

杂工况的货车而言, OFP 会随着市区工况占比的增加而上升(通过对比 I 车、III 车、IV 车可知),是由于低速段会产生大量的苯系物,而苯系物对应的 MIR 值相对较高,导致车辆 OFP 较高;最高和最低的 OFP 出现在 II 车和 V 车,均来自单一市郊工况测试循环的自卸车,II 车甲苯和乙醛的比排放量显著高于 V 车,这是两车 OFP 巨大差异的主要原因.

3 结论

3.1 国六重型柴油车甲苯、苯、苯乙烯三者的排放量之和占苯系物排放总量的 60%~86%,柴油机工况频繁变换的市区工况会促进苯和苯乙烯生成,但会抑制甲苯的生成.

3.2 甲醛、乙醛、苯甲醛 3 种物质排放量之和占国六重型柴油车醛酮类物质排放总量的 72%~87%,苯甲醛在醛酮类物质中的排放占比相对稳定,不易受到工况的影响;低速段易产生甲醛的排放,而乙醛则在中高速段大量生成.

3.3 国六重型柴油车挥发性有机物排放易诱发臭氧的生成,本文样车平均 OFP 已达 $(249.53 \pm 10) \text{ mgO}_3/(\text{kW} \cdot \text{h})$.醛酮类物质为 OFP 的贡献主体,国六重型柴油车整个工况范围内低速段 OFP 最高,但是由于醛类物质较高的 MIR 系数导致中高速的臭氧潜势降低并不明显,需要重点关注国六柴油车挥发性有机物对臭氧生成的影响.

参考文献:

[1] 冯 畅,刘锐源,刘雷璐,等.广州典型印刷企业 VOCs 排放特征及环境影响和健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2020,40(9):3791-3800.
Feng C, Liu R Y, Liu X L, et al. VOCs emission characteristics, environmental impact and health risk assessment of typical printing enterprises in Guangzhou [J]. China Environmental Science, 2020, 40(9):3791-3800.

[2] 肖 龙,王 帅,周 颖,等.中国典型背景站夏季 VOCs 污染特征及来源解析 [J]. 中国环境科学, 2021,41(5):2014-2027.
Xiao L, Wang S, Zhou Y, et al. The characteristics and source apportionments of VOCs at typical background sites during summer in China [J]. China Environmental Science, 2021,41(5):2014-2027.

[3] 姚志良,王岐东,王新彤,等.典型城市机动车非常规污染物排放清单 [J]. 环境污染与防治, 2011,33(3):96-101.
Yao Z L, Wang Q D, Wang X T, et al. List of unregulated pollutants from motor vehicles in typical cities [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2011,33(3):96-101.

[4] 李莉娜,夏 青,秦承华,等.挥发性有机物排放监测监管主要问题和对策探析 [J]. 环境保护, 2020,48(15):27-32.

- Li L N, Xia Q, Qin C H, et al. Problems and countermeasures of volatile organic compounds monitoring and regulation in China [J]. Environmental Protection, 2020,48(15):27-32.
- [5] Yao Z, Shen X, Ye Y, et al. On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2015,103:87-93.
- [6] Tsai J, Chang S, Chiang H. Volatile organic compounds from the exhaust of light-duty diesel vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2012,61:499-506.
- [7] Yao Z, Jiang X, Shen X, et al. On-road emission characteristics of carbonyl compounds for heavy-duty diesel trucks [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015,15(3):915-925.
- [8] Jobson B T, Derstroff B, Edtbauer A, et al. Urban air chemistry and diesel vehicles emissions: quantifying small and big hydrocarbons by CIMS to improve emission inventories [J]. Atmospheric Environment, 2017,166:566-569.
- [9] 凌鑫晨,吴 锋,姚栋伟.乙醇汽油发动机非常规排放特性的试验研究 [J]. 内燃机工程, 2016,37(5):14-20.
- Ling X C, Wu F, Yao D W. Testing study on unregulated emissions from a SI engine fueled with ethanol-gasoline blends [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016,37(5):14-20.
- [10] Agarwal A K, Chandra Shukla P, Patel C, et al. Unregulated emissions and health risk potential from biodiesel (KB5, KB20) and methanol blend (M5) fuelled transportation diesel engines [J]. Renewable Energy, 2016,98:283-291.
- [11] 罗佳鑫,温 溢,杨正军,等.国六轻型车实际道路与实验室工况排放特性对比研究 [J]. 车用发动机, 2019,(6):64-70.
- Luo J X, Wen Y, Yang Z J, et al. Comparative study on emission characteristics of light vehicles in actual road and laboratory conditions [J]. Vehicle Engine, 2019,(6):64-70.
- [12] EPA/625/R-96/010b(TO-17) Determination of volatile organic compounds in ambient air using active sampling onto sorbent tubes [S].
- [13] EPA/625/R-96/010b(TO-11A) Determination of formaldehyde in ambient air using adsorbent cartridge followed by high performance liquid chromatography (HPLC) [S].
- [14] 许丹丹.重型整车排放测试方法对比研究 [D]. 石家庄:河北工业大学, 2017.
- Xu D D. Study on test methods of heavy-duty vehicles emissions [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Technology, 2017.
- [15] 黎大端,何松立,杨舒婷,等.Tenax-TA 热脱附管对正己烷和丙酮吸附采样条件探究 [J]. 广东化工, 2018,45(7):78-79.
- Li D D, He S L, Yang S T, et al. Study on sampling conditions of adsorption of n-hexane and acetone by Tenax-TA thermal desorption [J]. Guangdong Chemical, 2018,45(7):78-79.
- [16] Lowi Jr A, Carter W P L. A method for evaluating the atmospheric ozone impact of actual vehicle emissions, Detroit, MI, United states, 1990 [Z]. SAE International, 1990.
- [17] W Carter. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Journal of Air & Waste Management Association, 1994,44:881-899.
- [18] Dong D, Shao M, Li Y, et al. Carbonyl emissions from heavy-duty diesel vehicle exhaust in China and the contribution to ozone formation potential [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(1):122-128.
- [19] Yao Z, Shen X, Ye Y, et al. On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2015,103:87-93.
- [20] HJ 1137-2020 甲醇燃料汽车非常规污染物排放测量方法 [S].
- HJ 1137-2020 Measurement methods for non-regulated emissions from methanol fuelled vehicles [S].

致谢: 本实验的现场采样工作由北京理工大学排放实验室侯宇旭等协助完成,在此表示感谢.

作者简介: 刘希瑞(1995-),男,甘肃兰州人,北京理工大学硕士研究生,主要从事机动车污染物排放研究.