

基于 PEMS 测试的工程机械柴油机排放特性

李远, 黄亚强, 黄志强, 阚海, 郑建

上海机动车检测认证技术研究中心有限公司, 上海 201805

摘要:以某非道路国四大功率挖掘机为对象,采用便携式排放测量系统(portable emission measurement system, PEMS)测试方法研究其不同工况实际作业的排放特性,计算基于功率、时间和油耗的气态污染物排放因子,并分析基于时间加权与功基窗口法的气态污染物比排放差异。研究表明:挖掘机实际作业工况主要分布在中高转速和负荷区域,行走工况和作业工况下柴油机输出功占总输出功的96%;挖掘机实际作业环境下的油耗特征分布与工况有关,怠速工况的燃油消耗率最高,为408.65 g/(kW·h);怠速工况 NO_x 和CO基于功率的排放因子明显高于行走和作业工况,CO和 NO_x 基于功率、时间、油耗的排放因子在行走和作业工况下基本处于同一水平;冷启动工况下 NO_x 排放因子和 NO_x 排放质量均最大;基于时间加权的气态污染物比排放大于功基窗口法, NO_x 比排放偏高约1.9倍。

关键词:非道路工程机械;排放特性;PEMS;实际作业

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)02-0059-06

引用格式:李远,黄亚强,黄志强,等.基于PEMS测试的工程机械柴油机排放特性[J].内燃机与动力装置,2024,41(2):59-64.

LI Yuan, HUANG Yaqiang, HUANG Zhiqiang, et al. Emission characteristics of a diesel engine for a construction machinery based on PEMS test [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(2):59-64.

0 引言

我国工程机械保有量逐年上升,其尾气排放对环境的影响越来越大。挖掘机是工程机械中的典型工作机械,大多以柴油机为动力。2021年我国工程机械排放总量中,挖掘机排放的HC、 NO_x 、颗粒物(particulate matter, PM)分别为4.2、52.2、3.9万t,分别约占2021年工程机械排放总量的37.0%、36.3%、52.3%^[1]。

我国于2019年出台了《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》^[2],推荐了适用于不同条件的简易、一般和复杂方法等3种方法编制移动源排放清单。目前,关于工程机械排放的研究中,大多采用基于油耗的排放因子,且都采用清单推荐值,因此无法体现各工程机械的功率水平差异和机械类别差异^[3-4]。研究工程机械排放特性的测试方法主要有台架测试和便携式排放测量系统(portable emission measurement system, PEMS)测试。台架测试方法的场地设备成本高,且无法完全模拟真实作业工况^[5-6],因此,利用PEMS分析工程机械实际作业排放特性的研究越来越多。

研究工程机械实际排放因子可为编制排放清单提供真实数据,有利于国家针对性地制定相关环保政策和排放标准。王国强等^[7]利用PEMS测试方法研究了装载机的排放特性,发现不同作业工况的装载机 NO_x 排放差别较大,但与装载机负荷率不相关。吴笛等^[8]采用PEMS测试方法对装载机、挖掘机、叉车实际作业工况下的排放因子进行研究,结果表明:挖掘机基于时间的排放因子最大,装载机基于功率的排放

收稿日期:2023-10-25

第一作者简介:李远(1992—),女,河南商丘人,工学硕士,助理工程师,主要研究方向为发动机排放测试研究,E-mail:yuanl@smvic.com.cn。

因子最大。颜欣迪等^[9]分析了怠速、高怠速、自由加速和实际作业4种工况下港口作业机械基于油耗的排放因子,结果表明,CO、THC排放因子具有类似规律,怠速工况下的排放因子均大于作业工况。李世峰等^[10]研究了冷起动对国四装载机排放因子的影响,发现包括冷起动的CO比排放是不包括冷起动的2.23倍,包括冷起动的NO_x和CO₂比排放与不包括冷起动的结果相近。潘召祥等^[11]为推动高原地区非道路柴油移动机械排放清单的建立,研究了高海拔下装载机不同工作模式下基于时间和油耗的排放因子,结果表明:基于时间的高原整体排放比平原高,基于燃油的CO与NO_x的实测数据分别比国家标准规定限值高14.34%、39.89%。马帅等^[12]利用PEMS系统对8台挖掘机的排放情况进行研究,结果表明:与国一阶段相比,国二阶段的挖掘机在怠速、行走、作业工况下排放的NO分别减小8%、35%和5%,PM_{2.5}分别降低88%、87%和80%;估算得到的挖掘机基于功率的排放因子中,CO、HC、NO的排放因子低于国家排放标准。付明亮等^[13]利用PEMS对45辆典型工程机械进行实际工况排放测试,结果表明:工况对工程机械排放速率和排放因子的影响十分明显,多数瞬时排放峰值出现在作业工况下;怠速工况下,CO和HC基于油耗的排放因子较大;作业工况下,NO_x和PM的基于油耗的排放因子较大。

非道路机械实际作业排放与工况关系较大。目前非道路国四排放标准针对实际作业的测试要求比较宽泛,仅规定了循环功为道路车辆的5~7倍,没有对工况和负荷的详细要求,因此研究非道路国四大型挖掘机基于时间、油耗、功耗的排放因子十分必要。本文中基于PEMS,采用累积法分析非道路国四大型挖掘机的排放特性,研究实际工作时各工况的分布比例以及冷起动、怠速、作业、行走4种工作工况下的排放因子差异,并进一步计算基于时间加权的综合排放因子与功基窗口法的结果差异,为编制排放清单提供真实数据。

1 试验对象及试验方案

1.1 试验对象

试验用6缸挖掘机满足非道路国四排放标准,后处理系统包括废气再循环、氧化催化器、颗粒捕集器和氨捕捉器。该挖掘机已累计运行2000h,磨合良好且未大修,能顺利进行数据的采集和测试,可提高试验效率。该挖掘机及搭载的柴油机主要技术参数如表1所示。

表1 挖掘机及柴油机主要技术参数

整备质量/kg	铲斗容量/m ³	额定功率/kW	最大扭矩/(N·m)	怠速转速/(r·min ⁻¹)	NRTC循环功/(kW·h)
37100	1.00~2.53	220	1475	800±50	25.76

注:NRTC为非道路瞬态循环(non-road transient cycle)。

1.2 试验设备及试验装置

试验设备主要包括车载气体分析仪、发电机、排气流量计、车载自动诊断系统(on board diagnostics, OBD)、全球卫星定位系统(global positioning system, GPS),试验装置示意图如图1所示。

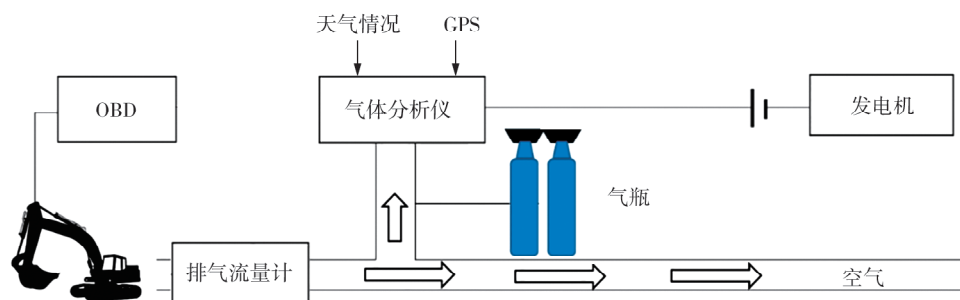


图1 试验装置示意图

车载气体分析仪采用 AVL 493D Gas PEMS IX,分析单元包含红外线分析仪、氢火焰离子化分析仪和化学发光分析仪,测量尾气中 CO、CO₂、HC、NO_x 体积分数;排气流量计为 AVL 的 EFM TUBE EXTENSION 2.5-INCHES,与排气尾管相连,直接采集车辆尾气,测量挖掘机排气质量流量等信息;GPS 安装在挖掘机机身上,实时测量经度、纬度、海拔高度以及挖掘机的瞬时速度等;大气压力传感器采集大气压力;温度、湿度传感器测量环境温度和湿度;OBD 电脑与挖掘机的 OBD 诊断接口相连,实时记录发动机转速、转矩、燃油消耗率、冷却液温度、负荷等信息。为保证试验数据的精度,试验前、后均对设备进行标定。

1.3 试验方案

挖掘机的常见工况为冷启动、怠速、行走和作业工况。冷启动工况是指挖掘机启动后冷却液温度低于 70 ℃ 的时间段;怠速工况指发动机转速为怠速转速(800 r/min±50 r/min),在原地保持静止的工况;行走工况指挖掘机前进或后退,挖斗不工作,且速度大于 3 km/h 的时间段;作业工况是指除去冷启动、行走和怠速的时间之外,挖掘机挖斗开始挖掘的时间段,车速一般小于 3 km/h。

测试场地开阔,挖掘面积为 10 m×30 m 左右,可供挖掘机移动及挖土。试验挖掘机按照平时真实操作状态开始排放测试后,整个测试过程不间断采样且记录瞬时数据,测试持续时间基于机械做功计算,当机械累计做功达到约 7 倍发动机 NRTC 循环功时,测试停止,整个测试时间不低于 2 h。

1.4 测试流程

基于 PEMS 的挖掘机排放测试流程如图 2 所示。

1) 用绑带或者固定支架等将 PEMS 设备安装到试验用挖掘机上,采用防震垫减少振动对设备的影响;连接挖掘机排气管路和测试装置时,需要注意密封垫和卡箍的安装,保证尾气不泄露。2) 上电启动,检查通信设备是否正常,如果异常需要检查线路连接。3) 标定设备的零气和量距气,保证设备零点和量程的正确性。4) 正式开始试验,测试机械在实际工作工况下排放,同时记录数据。5) 对设备进行零点漂移检查后拆卸设备。

1.5 数据处理方法

按冷启动、怠速、行走和挖掘作业 4 种工况,将采集的挖掘机实际作业尾气排放数据进行归集,分析真实作业场景下各工况的占比,计算各工况下的排放因子。采用累积法处理数据,计算挖掘机基于时间、油耗、功率的污染物排放因子。

基于时间的排放因子

$$e_t = E_i / t, \quad (1)$$

式中: E_i 为某工况下的柴油机气态污染物排放, g; t 为时间, s。

基于油耗的排放因子

$$e_f = E_i / m_{F,t}, \quad (2)$$

式中: $m_{F,t}$ 为工况下的柴油机油耗, kg。

基于功率的排放因子

$$e_w = E_i / W_i, \quad (3)$$

式中: W_i 为某工况下的柴油机输出功, kW·h, $\{W_i\}$ 为以 kW·h 为单位的 W_i 的数值, $\{W_i\} = \frac{1}{3600} \{n\} \{T\}$,

其中, $\{n\}$ 为以 r/min 为单位的发动机转速 n 的数值, $\{T\}$ 为以 N·m 为单位的转矩 T 的数值。

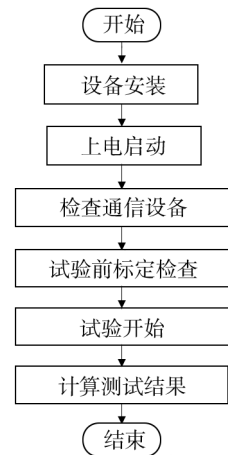


图2 挖掘机排放测试流程图

2 挖掘机实际作业工况特性

2.1 实际作业的柴油机工况点分布

在作业过程中,柴油机根据挖掘机工况需求不断变化工作点,持续作业 6 208 s,工况点分布如图 3 所

示。由图3可知:工作负荷为70%以上的工况占比约22%,工作负荷为50%以上的工况占比65%,挖掘机实际作业工况主要分布在中高负荷区域。

2.2 实际作业的整机工况特点

在满足非道路国四 PEMS 测试要求的 5~7 倍循环功的工作时间内,挖掘机冷启动、怠速、行走和挖掘作业的工况时间分别为 573、153、1 857、3 625 s,分别占总测试时间的 9.2%、2.5%、29.9%和 58.4%。挖掘机在行走和挖掘作业时,柴油机的输出功分别为 69.25、115.78 kW·h,2 种工况做功占总输出功的 96%;行走时挖掘机最高平均车速为 9.06 km/h,作业时平均车速为 1.33 km/h。

2.3 实际作业不同工况的油耗

PEMS 测试要求采用碳平衡法验证试验数据的有效性。若通过碳平衡法计算和 ECU 读取的油耗的相对偏差在 $\pm 5\%$ 以内,则试验数据有效^[14]。经试验,碳平衡法计算的挖掘机燃油消耗率为 204.03 g/(kW·h),ECU 读取的燃油消耗率为 203.17 g/(kW·h),相对偏差为 -0.42%,试验数据有效。

挖掘机油耗与工况有关,怠速工况的燃油消耗率最高,为 408.65 g/(kW·h),冷启动工况、行走工况的燃油消耗率基本持平,约为 225.84 g/(kW·h),挖掘工况的燃油消耗率为 339.25 g/(kW·h)。

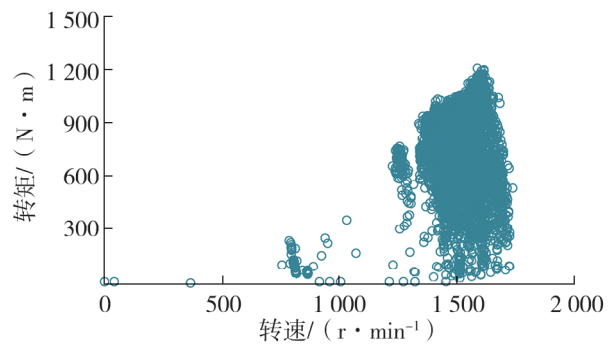


图3 柴油机工况点分布

3 挖掘机实际作业的排放特性

3.1 挖掘机实际作业排放因子

分别计算挖掘机实际作业不同工况下、不同气体的基于时间、油耗、功率的排放因子,结果如表2所示。

表2 挖掘机实际作业不同工况的气态污染物排放因子对比

工况	基于时间的排放因子/(g·s ⁻¹)		基于油耗的排放因子/(g·kg ⁻¹)		基于功率的排放因子/[g·(kW·h) ⁻¹]	
	CO	NO _x	CO	NO _x	CO	NO _x
冷启动	0.002 4	0.048 8	0.843	16.966	0.190	3.832
怠速	0.001 6	0.002 2	0.145	0.200	1.389	1.910
行走	0.005 1	0.003 4	0.604	0.395	0.138	0.090
挖掘	0.005 2	0.004 3	0.478	0.400	0.162	0.136

由表2可知:1)怠速工况下,气态污染物基于功率的排放因子明显高于其他工况,基于功率的排放因子是目前常用的排放评价指标,在后续非道路机械的排放标准升级时有必要考虑提高怠速工况在总测试时间的占比;2)怠速工况下基于时间和油耗的气态污染物排放因子均低于行走和挖掘工况;3)行走和挖掘工况下气态污染物排放因子基本处于同一水平,因此进行非道路机械实际作业排放管理时无需详细区分行走和挖掘工况。

3.2 不同数据处理方法的气态污染物比排放对比

非道路国四排放标准采用功基窗口法计算气态污染物的比排放。本文中采用 PEMS 方法测量各种气态污染物排放总量,转化为各工况下的气态污染物比排放,再根据挖掘机实际作业各工况的时间占比,得到基于时间的加权比排放。对比分析挖掘机采用时间加权法与功基窗口法计算的气态污染物比排放,结果如表3所示。

表3 时间加权法与功基窗口法计算的气态污染物比排放对比

气态污染物	时间加权法比排放/[g·(kW·h) ⁻¹]	功基窗口法比排放/[g·(kW·h) ⁻¹]
CO	0.188	0.181
NO _x	0.507	0.177

由表3可知:基于时间加权法计算的气态排放污染物比排放大于功基窗口法,特别是NO_x比排放,比功基窗口法的计算结果约高1.9倍,同时超出了非道路国四限值^[15],主要由于行走和作业工况在实际作业总时间中占比较大导致。但是,时间加权法更能反应挖掘机实际作业的排放水平,在进行非道路实际作业排放测试时应规定好各工况的时间占比,并按照时间加权法计算气态污染物实际排放因子。

4 结论

1)挖掘机实际作业工况点主要分布在中高转速和负荷,实际作业中行走和挖掘时间占地最高,这2种工况下柴油机输出功占总输出功的96%。

2)碳平衡法计算的挖掘机燃油消耗率为204.03 g/(kW·h),ECU读取的燃油消耗率为203.17 g/(kW·h),相对偏差为-0.42%,试验数据有效。

3)实际作业环境下,挖掘机的油耗与工况有关,怠速工况下的燃油消耗率最高,为408.65 g/(kW·h),冷启动工况、行走工况的燃油消耗率基本持平,约为225.84 g/(kW·h);挖掘工况的燃油消耗率为339.25 g/(kW·h)。

4)怠速工况下,NO_x和CO基于功率的排放因子明显高于行走和挖掘工况;行走和挖掘工况下,NO_x和CO的基于功率、时间、油耗的排放因子基本处于同一水平,在非道路实际作业的排放测试中无需详细区分行走和挖掘,仅以负荷占比进行规定即可;冷启动工况下的NO_x排放因子最高。

5)采用时间加权法计算的比排放大于功基窗口法计算的比排放,NO_x比排放偏高约1.9倍。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报[R]. 北京:生态环境部,2022.
- [2] 生态环境部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[S]. (2014-12-31)[2023-09-20]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf>.
- [3] 刘鹏,胡明伟,段华波,等. 深圳市非道路移动机械排放清单研究[J]. 深圳大学学报(理工版),2021,38(4):331-339.
- [4] 韩昊,刘剑筠,朱倩茹,等. 广东省典型非道路移动机械排放清单研究[J]. 中国科技成果,2017,18(13):58-61.
- [5] 杨俊,张晏飞,陈曦,等. 台架模拟非道路移动机械车载法排放试验的方法研究[J]. 汽车科技,2021(1):19-24.
- [6] 刘坤,王锋德,刘顺利,等. 基于功基窗口法的拖拉机典型工况排放特性研究[J]. 农业装备与车辆工程,2019,57(6):8-10.
- [7] 王国强,张涛,梁昌水,等. 基于PEMS的非道路四阶段装载机排放研究[J]. 机械工程与自动化,2021(5):42-44.
- [8] 吴笛,刘坤. 基于PEMS的非道路移动机械排放测试方法研究新探[J]. 时代汽车,2022(5):13-14.
- [9] 颜欣迪,葛蕴珊,王欣,等. 青岛市在用港作机械排放特性[J]. 中国环境科学,2019,39(12):5018-5028.
- [10] 李世峰,郑永明,黄从魁,等. 实际作业工况下国四装载机的排放特性[J]. 内燃机与配件,2022(23):10-12.
- [11] 潘召祥,王勇,翟军强,等. 高原环境下装载机排放因子的研究[J]. 青海大学学报(自然科学版),2023,41(2):100-105.
- [12] 马帅,张凯山,王帆,等. 现实工况下挖掘机尾气排放特征分析[J]. 环境科学,2019,40(4):1670-1679.
- [13] 付明亮,丁焰,尹航,等. 基于燃油消耗的工程机械排放因子研究[J]. 北京理工大学学报,2014,34(2):138-142.
- [14] 陈杰,戴翼昊,郑华峰,等. 中小功率农用柴油机的排放特性分析[J]. 柴油机设计与制造,2023,29(2):34-38.

- [15] 环境保护部科技标准司. 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法: 中国第三、四阶段: GB 20891—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.

Emission characteristics of a diesel engine for a construction machinery based on PEMS test

LI Yuan, HUANG Yaqiang, HUANG Zhiqiang, KAN Hai, ZHENG Jian

Shanghai Motor Vehicle Inspection Certification & Tech Innovation Center Co., Ltd., Shanghai 201805, China

Abstract: Based on a China non-road IV diesel engine used by excavator, the portable emission measurement system (PEMS) test method is adopted to study the emission characteristics of the actual operation in different working conditions, the emission factors based on power, time and fuel consumption are calculated, and the difference in specific emission of gaseous pollutants based on time-weighted and power-based window method is analyzed. Research result shows that the actual operating conditions of the digger are mainly distributed in the medium and high rotating speed and load areas. The output work of diesel engine accounts for 96% of the total output work. The distribution of fuel consumption characteristics in the actual operating environment of the excavator is related to the working conditions, the highest specific fuel consumption in the idle speed condition, for 408.65 g/(kW·h). The power-based emission factors of NO_x and CO of idling are significantly higher than the moving and working conditions, CO and NO_x emission factors of power, time, fuel consumption are basically at the same level under moving and working conditions. The NO_x emission factor and NO_x emission mass are the highest under the cold starting condition. The specific emission of gaseous pollutants based on time-weighted are larger than that of the power-based window method, NO_x emission is about 1.9 times higher.

Keywords: non-road construction machinery; emission characteristics; PEMS; actual operation

(责任编辑: 臧发业)

.....
(上接第 33 页)

airflow noise is determined at the perforation in the back row of the outlet pipe. Two optimization schemes are designed: changing the perforation structure of the outlet pipe to an intubation structure and blocking the perforation in the back row, and the sound pressure level and transmission loss are compared by simulation. A comparison is made between the structure of the aftertreatment device that blocks the rear perforation and the original design by vehicle acceleration testing. The simulation results show that both optimization schemes reduce the sound pressure level of airflow noise, and do not affect the noise reduction ability of the post-processing device. The test results also show that using a aftertreatment device structure to seal the rear perforation significantly reduces noise, and the broadband noise caused by fluid flow almost disappears. The total sound pressure level of the noise decreases from 90.4 dB to 82.3 dB.

Keywords: engine; aftertreatment device; air flow regeneration noise; transmission loss

(责任编辑: 胡晓燕)