

发动机进、排气系统漏气对碳平衡影响的试验研究

张旺^{1,2}, 刘俊霆^{1,2}, 贾春富^{1,2}, 刘强^{1,2}, 吴撼明^{1,2}, 李振国^{1,2*}

1. 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津 300300;
2. 中国汽车技术研究中心有限公司 移动源污染排放控制技术国家工程实验室, 天津 300300

摘要:针对发动机进、排气系统漏气影响碳平衡偏差问题,分别对进、排气系统不同管路漏气进行稳态特性、稳态循环、瞬态循环试验,测试和分析碳平衡偏差随漏气位置和漏气量的变化规律。结果表明:压气机后进气管或排气管路漏气时,测试工况点的碳平衡偏差均为正值,其中压气机后进气管漏气的最大碳平衡偏差为35%、排气管路漏气的最大碳平衡偏差为1.7%;压气机前进气管路漏气时,碳平衡偏差为负值,最大为-6.3%;碳平衡偏差的绝对值随进气系统漏气量的增加而增大,但排气系统漏气量不影响碳平衡偏差。碳平衡偏差主要受进气管漏气影响,当碳平衡偏差超过3%时,若碳平衡偏差为正,应优先排查压气机后进气管路;若偏差为负,应优先排查压气机前进气管路。

关键词:碳平衡;碳平衡偏差;发动机进气和排气系统漏气

中图分类号:U467.498

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)03-0060-06

引用格式:张旺,刘俊霆,贾春富,等.发动机进、排气系统漏气对碳平衡影响的试验研究[J].内燃机与动力装置,2022,39(3):60-65.

ZHANG Wang, LIU Junting, JIA Chunfu, et al. Experimental study on engine carbon balance for air leakage of intake and exhaust system[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(3):60-65.

0 引言

根据质量守恒定律,发动机碳平衡就是燃烧前燃油中的碳与燃烧后以排气形式排出的碳相等^[1-2]。碳平衡偏差指燃烧前、后碳的变化率,是衡量碳平衡和判断发动机运行是否正常、循环是否有效的重要指标,发动机进、排气系统漏气会造成碳平衡偏差增大甚至超限。目前碳平衡方法多用于对燃油消耗率的测试和研究^[3-9],而根据碳平衡偏差分析发动机工作状态的研究相对较少。本文中旨在通过发动机台架试验,研究发动机进、排气系统漏气与碳平衡偏差的关系,通过碳平衡偏差的变化实现对漏气位置的指向性排查,既避免发动机运转时人工检查泄漏的潜在安全风险,提高数据有效性,也节约时间和试验成本。

1 试验方法与装置

1.1 试验系统

测试样机为一台8.4 L增压柴油机,柴油机主要参数如表1所示。测试设备包括进气流量计(ABB

收稿日期:2021-12-13

基金项目:天津市重点研发计划(19YFZCSF00960)

第一作者简介:张旺(1988—),男,天津人,助理工程师,主要研究方向为发动机排放后处理控制,E-mail:zhangwang202101@catarc.ac.cn。

*通信作者:李振国(1983—),山东莘县人,男,工学博士,高级工程师,主要研究方向为汽车污染物排放控制技术,E-mail:lizhenquo@catarc.ac.cn。

空气质量流量计)、油耗仪(AVL735S/753C)、气态排放分析仪(AVL_i60),主要测量参数的测量精度和量程如表2所示。

表1 柴油机主要参数

额定转速/(r·min ⁻¹)	最大扭矩/(N·m)	额定功率/kW	怠速/(r·min ⁻¹)
1800	1450	243	650

表2 主要测量参数的量程和精度

项目	进气流量/(kg·h ⁻¹)	油耗/(kg·h ⁻¹)	THC 体积分数	NO _x 体积分数	CO ₂ 体积分数	CO 体积分数	O ₂ 体积分数
量程	0~1200	3~125	0~5×10 ⁻³	0~5×10 ⁻³	0~0.2	0~1×10 ⁻²	0~0.21
精度	±0.5%	±0.32%	±0.3%满量程	±0.3%满量程	±0.5%满量程	±0.5%满量程	±0.5%满量程

碳平衡系统如图1所示(X表示直径为6mm的漏气孔,1#系统为压气机前进气系统,2#系统为压气机后进气系统,3#系统为排气系统)。

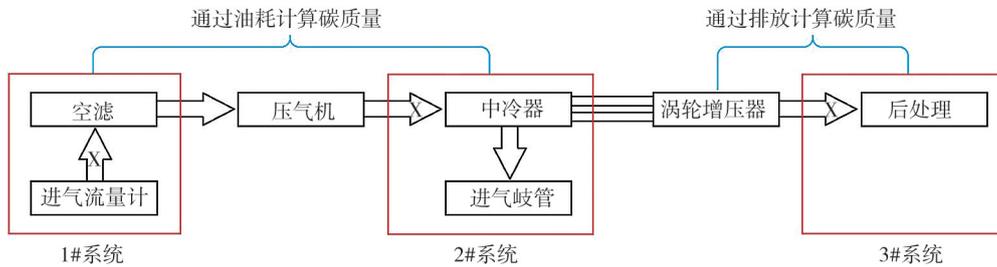


图1 碳平衡系统布置图

1.2 碳平衡与碳平衡偏差计算方式

燃油经过燃烧后由排气形式排出,发动机碳平衡是指排气中的碳质量与燃烧前燃油中的碳质量相等^[10-12],碳平衡偏差为燃烧前、后碳流量或碳质量的变化率,体现了发动机系统的气密性,重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)^[13]中要求稳态循环(world harmonized steady state cycle, WHSC)和瞬态循环(world harmonized transient cycle, WHTC)的碳流量偏差应在3%以内,若偏差超出3%,表明发动机系统存在明显的漏气。不同位置漏气导致碳平衡偏差向不同方向偏移,因此通过碳平衡偏差的正、负可快速辨别系统漏气位置,提高漏气排查效率和数据有效性。

将通过排气流量计测得的CO₂、CO、THC的质量流量换算成质量,并计算出废气中的碳质量,以此作为燃烧后燃油中的碳质量,以实测消耗燃油中的碳质量作为燃烧前燃油的碳质量,则碳平衡偏差可表示为实测燃油碳质量m₁与计算燃油碳质量m₂的变化率。

计算燃油碳质量

$$m_2 = \frac{m_{CO} \frac{Ar(C)}{Ar(C) + Ar(O)} + m_{CO_2} \frac{Ar(C)}{Ar(C) + 2Ar(O)} + m_{HC} C_f}{1000C_f} \quad (1)$$

式中:Ar(C)为进气中碳的相对原子质量,Ar(C)=12.0107;Ar(O)为进气中氧的相对原子质量,Ar(O)=15.9994;m_{CO}为排气中CO质量,g;m_{CO₂}为排气中CO₂质量,g;m_{HC}为排气中HC质量,g;C_f为燃油中的碳质量比,柴油中碳、氢、氧的摩尔比分别为1、1.86、0.006,碳、氢、氧的相对原子质量分别为12.0107、1.00794、15.9994,则C_f=12.011/(12.011+1.00794×1.86+15.9994×0.006)=0.859。

碳平衡偏差

$$C_b = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% = \frac{0.429m_{CO} + 0.273m_{CO_2} + 0.859m_{HC}}{859} - m_1 \times 100\% \quad (2)$$

由式(2)可知,碳平衡偏差主要与排气流量以及 CO_2 、 CO 、 THC 的质量流量有关,由于后处理后尾气中的 CO 与 THC 排放很小,因此本文中主要研究 CO_2 体积分数与排气流量对碳平衡偏差的影响。

2 结果与讨论

2.1 不同漏气位置对稳态工况碳平衡的影响

试验测试发动机的万有特性,碳平衡偏差测试工况点如图2所示,在转速分别为 800、1000、1200、1400、1600、1800 r/min 时,每个转速对应的转矩范围内均分为 5 个测试点(按转矩由大到小分别记作 A、B、C、D、E),共进行 30 个工况点的碳平衡偏差测试,万有特性各测试工况点对应的转矩如表3所示,正常状态(无漏气)发动机万有特性各测试工况点碳平衡偏差如表4所示。由表4可知,各测试工况点的碳平衡偏差为 $-0.85\% \sim 0.99\%$ 。

在进、排气系统不同部位制造漏气孔($\Phi 6 \text{ mm}$)模拟进、排气系统漏气(如图1)。正常状态和压气机前、压气机后、排气系统漏气时万有特性各测试工况点的 CO_2 体积分数如表5所示。

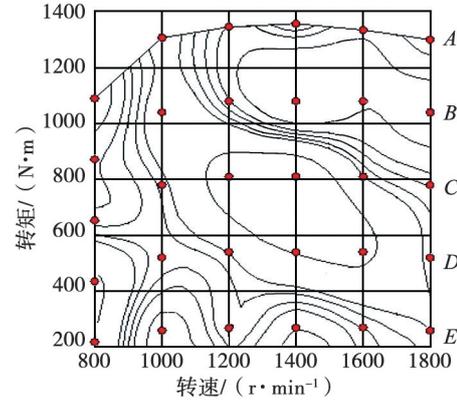


图2 正常状态万有曲线碳平衡偏差测试工况点

表3 万有特性测试工况点转矩 $\text{N} \cdot \text{m}$

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	工况点				
	A	B	C	D	E
800	1100	875	650	425	200
1000	1300	1035	770	505	240
1200	1350	1075	800	510	250
1400	1380	1100	820	540	260
1600	1350	1075	800	510	250
1800	1100	885	670	455	240

表4 正常状态万有特性碳平衡偏差 %

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	工况点				
	A	B	C	D	E
800	0.75	0.37	0.29	-0.47	-0.37
1000	-0.03	-0.12	0.10	0.17	0.67
1200	0.35	0.33	-0.60	0.03	0.14
1400	0.13	0.99	-0.85	-0.40	0.52
1600	0.48	0.56	0.03	-0.47	0.20
1800	0.22	0.68	0.25	0.09	0.05

表5 不同漏气位置发动机万有特性测试工况点 CO_2 体积分数

10^{-3}

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	漏气位置	工况点					转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	漏气位置	工况点				
		A	B	C	D	E			A	B	C	D	E
800	无漏气	42.9	68.4	88.5	108.9	126.5	1400	无漏气	46.3	62.6	71.5	80.9	93.5
	压气机前	42.6	68.1	87.9	108.9	127.0		压气机前	46.3	62.3	73.7	81.4	94.2
	压气机后	42.1	66.1	88.0	111.3	134.5		压气机后	48.1	68.1	80.1	91.1	102.3
	排气系统	42.6	68.6	89.0	110.0	127.9		排气系统	46.2	62.4	71.1	80.4	92.2
1000	无漏气	48.6	71.1	88.0	102.7	116.1	1600	无漏气	40.9	55.8	66.3	80.7	94.0
	压气机前	48.5	71.1	87.1	103.3	115.8		压气机前	40.7	56.2	66.4	80.7	94.7
	压气机后	49.2	74.3	94.4	113.5	129.4		压气机后	43.4	61.8	74.1	84.9	97.9
	排气系统	48.2	71.3	87.8	102.5	114.9		排气系统	40.7	54.9	65.1	78.9	92.1
1200	无漏气	48.0	66.6	78.7	89.5	99.4	1800	无漏气	37.1	50.1	62.6	78.7	94.6
	压气机前	48.6	67.6	81.3	90.3	100.0		压气机前	37.1	51.0	62.6	78.7	94.1
	压气机后	50.0	72.2	87.1	101.1	113.2		压气机后	39.8	56.4	69.5	82.7	99.0
	排气系统	47.4	65.9	78.6	88.7	98.4		排气系统	36.4	49.9	61.6	77.3	92.5

由表5可知:压气机前漏气与排气系统漏气时,CO₂体积分数基本保持不变;压气机后漏气时,发动机转速为800 r/min,CO₂体积分数与正常状态基本相同,转速为1000~1800 r/min,CO₂体积分数大于正常状态,且随着转矩的增大,CO₂体积分数与正常状态CO₂体积分数的差别逐渐增大。

正常状态、压气机前、压气机后、排气系统漏气时万有特性各测试工况点的排气质量流量如6所示。

表6 不同漏气位置发动机万有特性测试工况点排气质量流量

kg/h

转速/ (r·min ⁻¹)	漏气位置	工况点					转速/ (r·min ⁻¹)	漏气位置	工况点				
		A	B	C	D	E			A	B	C	D	E
800	无漏气	220.8	249.8	286.9	317.9	351.3	1400	无漏气	462.0	601.8	756.1	898.6	953.6
	压气机前	216.1	243.4	279.3	308.9	342.7		压气机前	463.4	592.5	764.6	876.7	931.8
	压气机后	249.4	289.2	330.2	364.2	405.7		压气机后	494.6	642.0	795.0	935.9	1021.5
	排气系统	226.2	250.1	286.6	317.8	350.6		排气系统	464.1	603.6	760.8	904.4	958.8
1000	无漏气	290.1	358.6	427.0	480.7	532.2	1600	无漏气	605.9	783.1	972.4	1061.0	1094.3
	压气机前	283.6	351.1	413.5	472.5	520.5		压气机前	599.3	761.3	952.6	1041.6	1072.3
	压气机后	330.5	405.1	474.3	529.9	595.4		压气机后	645.9	806.5	994.1	1144.2	1211.5
	排气系统	299.8	359.4	428.4	481.8	537.3		排气系统	608.3	784.3	975.4	1065.3	1109.2
1200	无漏气	369.3	476.1	582.0	681.6	747.7	1800	无漏气	751.1	961.6	1127.8	1194.4	1233.6
	压气机前	361.5	463.4	587.5	665.4	732.7		压气机前	736.7	943.9	1109.3	1175.2	1202.8
	压气机后	411.0	510.2	627.5	726.2	795.3		压气机后	789.9	986.6	1159.6	1299.8	1351.5
	排气系统	374.3	478.0	580.0	681.3	751.9		排气系统	763.2	974.7	1137.2	1199.4	1254.3

由表6可知:压气机前漏气时,不同转速、负荷的排气流量略低于实际排气流量,这是因为发动机运转时,压气机前为负压状态,漏气孔吸入空气,这部分空气未经过进气流量计,造成计算排气流量降低;压气机后漏气时,排气流量随着转速、负荷的升高而迅速增加,这是因为低转速、低负荷时增压压力小,气体泄漏少,而随着转速、负荷的增加,增压压力迅速增大,气体泄漏也随之增加;排气系统漏气时,不同转速、负荷下测量的排气流量略高于实际排气流量,这是因为漏气使排气背压减小,气门叠开时新鲜空气进入气缸也增加部分排气流量。

压气机前、压气机后、排气系统漏气的发动机万有特性测试工况点碳平衡偏差如表7~9所示。

表7 压气机前漏气碳平衡偏差 %

转速/ (r·min ⁻¹)	工况点				
	A	B	C	D	E
800	-4.8	-4.2	-4.2	-3.9	-3.5
1000	-5.0	-4.9	-4.2	-3.2	-3.4
1200	-5.9	-5.3	-5.3	-3.6	-2.3
1400	-6.3	-5.9	-5.9	-4.7	-3.1
1600	-5.7	-5.4	-6.0	-4.8	-4.3
1800	-5.9	-6.1	-5.8	-4.1	-3.3

表8 压气机后漏气碳平衡偏差 %

转速/ (r·min ⁻¹)	工况点				
	A	B	C	D	E
800	30	28	25	21	17
1000	30	29	25	23	20
1200	32	30	27	21	18
1400	33	29	27	23	21
1600	32	32	26	23	21
1800	35	31	27	24	23

表9 排气系统漏气碳平衡偏差 %

转速/ (r·min ⁻¹)	工况点				
	A	B	C	D	E
800	0.8	0.6	0.2	0.4	0.2
1000	0.9	0.9	0.7	0.4	0.5
1200	1.1	0.7	0.3	0.2	0.6
1400	1.7	1.1	0.5	0.2	0.3
1600	1.5	1.4	0.7	0.1	0.5
1800	1.2	0.6	0.8	0.4	0.2

由表7可知:压气机前漏气时,由于排气流量减少,碳平衡偏差均为负值(向负值方向偏移),且整体上呈负荷越大,碳平衡偏差向负值方向偏移越大的趋势,转速为800~1000 r/min,压气机入口端为负压状态,低负荷工况点的碳平衡偏差为-3.4%~-3.5%;转速为1200~1800 r/min,中高负荷时因增压器工作,压气机入口端负压升高,漏气量增加使排气流量下降,碳平衡偏差增大,最大为-6.3%。由表8可知:压气机后漏气时,由于排气流量与CO₂排放增加,碳平衡偏差均为正值(向正值方向偏移),且随着负荷增

加,碳平衡偏差向正值方向的偏移越大,转速为 800~1000 r/min,低负荷工况点的碳平衡偏差为 17%~20%;转速为 1200~1800 r/min,随增压器介入工作,中高负荷工况点排气流量与 CO₂ 排放增大,碳平衡偏差达到 35%。由表 9 可知:排气系统出现漏气时,碳平衡偏差均为正值,且整体上呈负荷越大,碳平衡偏差向正值方向的偏移越大的趋势,低负荷工况点的排气系统漏气对排气流量和 CO₂ 排放影响相对较小,碳平衡偏差为 0.1%~0.5%,随着负荷增加,碳平衡偏差增大,外特性点碳平衡偏差最大为 1.7%。

2.2 不同漏气位置对 WHSC 与 WHTC 试验循环碳平衡的影响

根据不同系统漏气情况进行 WHSC 与 WHTC 试验,测试得到的循环 CO₂ 体积分数和循环排气质量流量如表 10、11 所示。

表 10 循环 CO ₂ 体积分数 10 ⁻⁶					表 11 循环排气质量流量 kg/h				
循环	正常状态	压气机前漏气	压气机后漏气	排气漏气	循环	正常状态	压气机前漏气	压气机后漏气	排气漏气
WHSC	49 072.4	49 054.0	53 485.4	49 465.6	WHSC	433.3	419.3	471.8	440.2
WHTC	35 769.5	35 812.1	38 785.8	36 177.1	WHTC	376.9	366.1	413.9	381.3

由表 10、11 可知:与正常状态相比,压气机前漏气 WHSC 与 WHTC 试验的 CO₂ 体积分数基本不变,WHSC 试验的循环排气流量下降 3.23%、WHTC 试验的循环排气流量下降 2.86%;压气机后漏气 WHSC 试验的循环 CO₂ 体积分数与排气流量均增加约 8.9%,WHTC 试验的循环 CO₂ 体积分数上升 8.4%,排气流量上升 9.8%;排气系统漏气 WHSC 与 WHTC 试验的循环 CO₂ 体积分数与排气流量均小幅增大,WHSC 试验的循环 CO₂ 体积分数增大 0.8%,排气流量增大 1.5%,WHTC 试验的循环 CO₂ 体积分数增大与排气流量均增大 1.1%。

根据 CO₂ 体积分数与排气流量计算出的循环碳平衡偏差如表 12 所示。

由表 12 可知:压气机前漏气时,碳平衡偏差为负;压气机后漏气时,碳平衡偏差为正;排气系统漏气时,碳平衡偏差基本与正常状态相当,仅略向正值偏移。

2.3 漏气量对碳平衡偏差的影响

漏气位置影响碳平衡偏差,漏气量也影响碳平衡偏差,本文中通过增加漏气孔(增大漏气量),研究漏气量对碳平衡偏差的影响,不同漏气孔数 WHSC 与 WHTC 试验的碳平衡偏差如图 3 所示。

由图 3 可知:进气系统漏气量(漏气孔)增加时,碳平衡偏差增大,但偏移方向不变。漏气孔在压气机前,排气流量随漏气孔增加而减小,漏气孔增加到 3 时碳平衡偏差降至 -6%,呈漏气孔越多,碳平衡偏差向负偏移越大的趋势;漏气孔在压气机后,CO₂ 体积分数和排气流量随漏气孔增加而增大,漏气孔增加到 3 时碳平衡偏差会增大至 24%,呈漏气孔越多,碳平衡偏差向正偏移越大的趋势;漏气孔在排气系统,漏气孔增加对碳平衡偏差无影响。

表 12 循环碳平衡偏差 %				
循环	正常状态	压气机前漏气	压气机后漏气	排气漏气
WHSC	0.002	-1.849	17.239	0.332
WHTC	0.001	-2.426	16.199	0.513

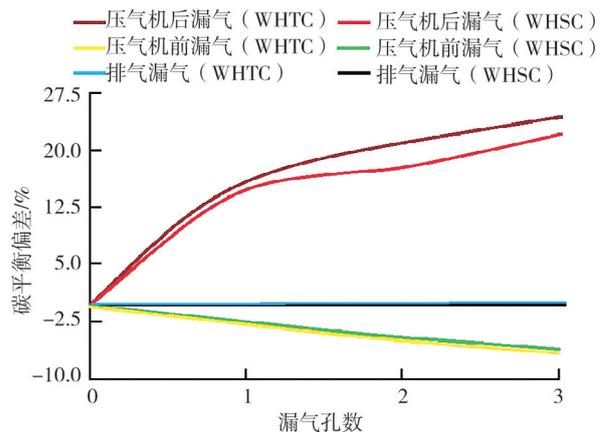


图 3 漏气孔数对碳平衡偏差的影响

3 结论

发动机进、排气系统漏气影响 CO₂ 的体积分数与排气流量,是造成碳平衡偏差的主要原因,不同漏气

位置和漏气量对碳平衡偏差有不同影响。

1) 压气机前漏气时碳平衡偏差为负,压气机后漏气和排气系统漏气时碳平衡偏差为正。压气机前漏气时,WHSC 和 WHTC 试验碳平衡偏差分别为-1.849%和-2.426%,万有特性测试工况点最大碳平衡偏差为-6.3%;压气机后漏气时,WHSC 和 WHTC 试验碳平衡偏差分别为 17.239%和 16.199%,万有特性测试工况点最大碳平衡偏差为 35%;排气系统漏气时,WHSC 和 WHTC 试验碳平衡偏差分别为 0.332%和 0.513%,万有特性测试工况点最大碳平衡偏差为 1.7%。

2) 进气系统漏气时,漏气量不影响碳平衡偏差的偏移方向,但影响碳平衡偏差值,且漏气量与碳平衡偏差的绝对值正相关;压气机前漏气时,碳平衡偏差为负,当漏气孔由 1 个增加至 3 个时,WHSC 和 WHTC 试验碳平衡偏差由 0 变化为-6.49%,压气机后漏气时,碳平衡偏差为正,当漏气孔由 1 个增加至 3 个时,WHSC 和 WHTC 试验碳平衡偏差分别由 0 变化为 23.53%;排气系统漏气时,漏气量不影响碳平衡偏差,漏气孔由 1 个增加至 3 个时,碳平衡偏差没有变化。

在发动机运行过程中,碳平衡偏差超过 3%时,可根据碳平衡偏差的正、负排查漏气位置,碳平衡偏差为负,应优先排查台架进气流量计之间的压气机前进气管路;碳平衡为正,应优先排查压气机到进气歧管之间的压气机后进气管路。

参考文献:

- [1] 冀树德,贾桢,张伟,等. 碳平衡法在柴油机排放测试中的应用[J]. 小型内燃机与车辆技术,2011,40(3):63-66.
- [2] 毛塞龙,郑建,王磊,等. 柴油机排放检测中碳流量偏差影响因素的研究[J]. 小型内燃机与车辆技术,2021,50(3):59-63.
- [3] 孙丽玮,王生昌,王晓东,等. 基于碳平衡法的柴油车燃油消耗计算模型[J]. 小型内燃机与车辆技术,2010,39(2):67-69.
- [4] 李彦睿,彭育辉,黄育鹏. 基于碳平衡法计算柴油机燃油消耗量的研究[J]. 车辆与动力技术,2018(4):6-10.
- [5] 方茂东,郑贺悦. 基于碳平衡法的汽车油耗测量方法[J]. 汽车工程,2003,25(3):295-297.
- [6] 刘军,李衍德,郭晨海,等. 碳平衡法燃油消耗量测试仪的开发[J]. 车用发动机,2007(1):30-34.
- [7] 陈庆平,李俊民. 汽油机油耗测量方法研究[J]. 科技信息,2012(16):49-50.
- [8] 郑贺悦,陆红雨,戴春蓓,等. 实验室内车辆油耗测量影响因素研究[J]. 汽车工程,2004,26(3):279-282.
- [9] 高继东,李孟良,王建海,等. 轻型汽车燃油经济性测试方法的相关性研究[J]. 汽车工程,2005,27(4):164-167.
- [10] 叶平雄,胡克容,杨聪,等. 车用发动机碳平衡影响因素的分析与研究[J]. 汽车实用技术,2020(7):164-167.
- [11] 李继才,陈乾,崔云翔,等. 基于碳平衡法的油耗检测方法简析[J]. 企业科技与发展,2018(6):55-56.
- [12] 耿磊,袁志玲,王奉双,等. SCR 系统中尿素对碳平衡的影响研究[J]. 内燃机与动力装置,2017,34(6):10-14.
- [13] 生态环境部. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 17691—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社,2018.

Experimental study on engine carbon balance for air leakage of intake and exhaust system

ZHANG Wang^{1,2}, LIU Juntong^{1,2}, JIA Chunfu^{1,2}, LIU Qiang^{1,2},
WU Hanming^{1,2}, LI Zhenguo^{1,2*}

1. CATARC (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300300, China;
2. National Engineering Laboratory for Mobile Source Emission Control Technology, China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China

Abstract: In order to study the influence of air leakage from engine intake and exhaust system on carbon flow,
(下转第 106 页)