

柴油添加剂的污染排放及动力性能评价

李颖^{1,2} 王占生^{1,2} 杨忠平^{1,2} 李春晓^{1,2} 王蕊涵^{1,2} 陈曦^{1,2}

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司; 2. 北京中油爱索节能环保技术有限公司)

摘要 选择满足国V排放标准的中型车用柴油机, 燃用国六标准的车用柴油和柴油添加剂开展台架试验, 评价了“老机烧新油”的污染排放及使用添加剂的影响。研究表明: “老机烧新油”可以达到排放限值要求, 加入柴油添加剂对污染物排放影响有限, 部分指标下降的同时其他指标略有上升, 总体可满足当前排放标准。加入柴油添加剂可显著降低柴油机喷嘴沉积物, 有较好的抑制喷嘴结焦堵塞的性能; 同时有较明显的提升动力性能和降低油耗的效果。

关键词 车用柴油; 排放标准; 柴油添加剂; 动力性能; 油耗

DOI: 10.3969/j.issn.1005-3158.2021.03.005

文章编号: 1005-3158(2021)03-0021-05

Pollution Emission and Dynamic Performance Evaluation of Diesel Additives

Li Ying^{1,2} Wang Zhansheng^{1,2} Yang Zhongping^{1,2} Li Chunxiao^{1,2} Wang Yihan^{1,2} Chen Xi^{1,2}

(1. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology;

2. Beijing CNPC-AISO Energy Conservation & Environmental Protection Technology Co., Ltd)

ABSTRACT Our group select medium-sized vehicle diesel engines that meet the National V emission standards, and use National VI vehicle diesel and diesel additives to carry out bench tests, reflecting the phenomenon of “old engines burning new oil”. Studies have shown that “old engine burning new oil” can meet the emission limit requirements. The addition of diesel additives can have a limited impact on pollutant emissions. Some indicators have declined while other indicators have risen slightly, which can generally meet current emission standards. Adding diesel additives can significantly reduce the deposits of diesel engine nozzles, and has better performance in inhibiting nozzle coking and clogging; at the same time, it has obvious effects of improving power performance and reducing fuel consumption.

KEY WORDS vehicle diesel; emission standards; diesel additives; power performance; fuel consumption

0 引言

汽柴油是城市交通、生产建设和运输不可或缺的动力来源, 而汽柴油燃烧排放的二次气溶胶是诱发雾霾天气的最主要来源之一, 其中柴油在燃烧过程中二次气溶胶排放量明显大于汽油, 对雾霾天气的诱发贡献更突出^[1]。为了改善空气质量, 2019年起在全国范围内开始逐步实施国六排放标准。国六排放标准较国V排放标准污染物排放限值大幅降低, 对国六油品性能提出更高要求。国六汽柴油在减少产生污染物质的同时相应减少了燃油中的主要燃烧组分, 烯芳烃总量由75%降到50%, 导致燃油在发动机内燃烧的温度和速度等发生变化, 实际使用中表现为油耗

增加。如何进一步提高发动机燃油燃烧性能, 在符合国六排放标准的同时获得更低的油耗和较好的动力性能, 是关系民生的重要问题。

生态环境部发布的《中国机动车环境管理年报》^[2]的统计数据显示, 截至2018年1月1日, 国Ⅲ标准的柴油车1 012.1万辆, 占柴油货车总量的51.7%; 国Ⅳ标准的柴油车802.4万辆, 占41.0%; 国Ⅴ及以上标准的柴油车106.2万辆, 占5.4%, 我国路上在运柴油车大多仍为国Ⅳ及以前排放标准。另一方面, 自2019年1月1日起, 我国全面停售国Ⅴ及以前水平的汽柴油, 开始销售国六阶段车用汽柴油。因此, 当前以及未来一段时间内, “老机烧新油”的现象将不可避免, 评估路上

李颖, 2014年毕业于中国石油大学(北京)化学工程专业, 硕士, 现在中国石油集团安全环保技术研究院有限公司从事环境保护研究工作。通信地址: 北京市昌平区黄河北街1号院1号楼523, 102206。E-mail: liying1416@cnpc.com.cn。

在运柴油车的污染排放情况具有十分重要的意义。

提高柴油发动机燃料的燃烧质量以减少尾气污染的方法很多,目前,使用柴油添加剂是最有效和最经济的方法之一。使用柴油添加剂既不用改动发动机结构,也不用增加设备,就可以提高燃油的燃烧性能,减少有害物质排放^[3]。常规柴油添加剂可以达到促进燃烧、清除沉积物、降低尾气排放等效果^[4],少数柴油添加剂已在改善发动机动力性能、降低油耗等方面有所突破。

本文以某型号柴油添加剂为例,选择国V标准的中型车用柴油机,燃用国六标准的车用柴油开展台架试验,研究柴油添加剂对发动机经济性、动力性和排放的影响。

1 试验方案

柴油机台架试验委托中国汽车技术研究中心(北京卡达克汽车检测技术中心有限公司)进行,发动机型号:4J28TC3,额定功率 81 kW。发动机通过联轴器与电力测功机相连,通过测功机测量发动机的转速、扭矩和功率,同时借助流量计测量燃油与空气流量。在发动机排气管上安装采样装置,分别使用气体分析仪、颗粒采集仪等设备测量发动机排气中的 CO、THC、NO_x 和 PM。其中,使用不分光红外(NDIR)测量 CO 浓度,氢火焰离子(FID)测量 THC,化学发光(CLD)测量 NO_x,使用部分流等比例稀释配合滤膜采集颗粒物,通过精密天平称重计算颗粒质量 PM,使用冷凝粒子计数器测量颗粒数目 PN。

对于柴油机的动力性和经济性,分别通过速度特性试验与负荷特性试验考察。速度特性需保持油门位置不变,通过改变测功机扭矩使发动机在不同转速下运转;负荷特性需保持发动机转速不变,通过改变油门位置使发动机在不同功率下运转。

参照 GB 17691—2005《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)》中柴油机排气污染物测量方法,分别使用稳态测试循环(ESC)和瞬态测试循环(ETC)开展研究。ESC 循环需测量 13 个规定工况点的柴油机排放,加权平均后计算得到单位排放,如图 1 所示。

ETC 循环需按照规定转速、扭矩连续运行 1 800 s,如图 2 所示。试验中以至少 1 Hz 的频率测量柴油机排放浓度,以完整试验的累积值计算得到单位排放。

考虑到后处理装置对柴油机减排的关键影响,且添加剂对后处理装置的影响尚不明确,试验中在后处理前后均测量气态污染物,以便更全面评估添加剂的作用。但由于滤膜采集颗粒物的方法不能获得瞬态数据,仅在后处理装置后测量颗粒排放。

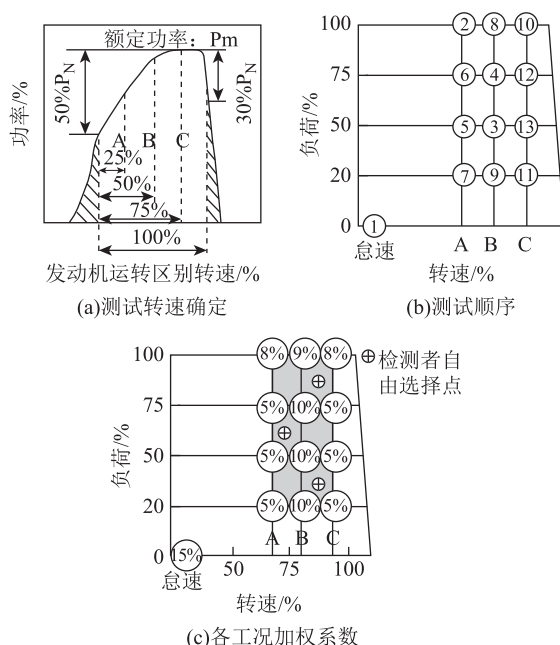


图 1 稳态测试循环(ESC)原理

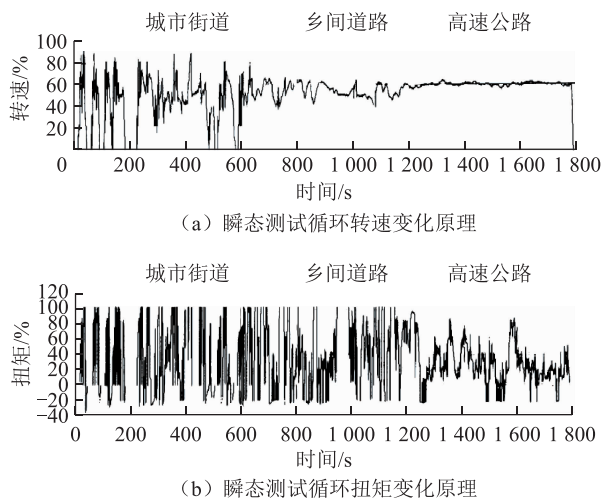


图 2 瞬态测试循环(ETC)原理

2 结果分析

2.1 控制排气污染物排放

稳态、瞬态测试排放结果分别见表 1、表 2,控制排气污染物排放结果平均变化率见表 3。

表 1 稳态测试排放结果 g/(kW·h)

催化器后	CO	THC	PM	NO _x
ESC 排放限值	1.50	0.46	0.020	2.00
基准油品	0.084	0.014	0.015	1.97
1 号剂	0.044	0.015	0.016	2.17
2 号剂	0.058	0.011	0.020	1.99

表 2 瞬态测试排放结果 g/(kW·h)

催化器后	CO	THC	PM	NO _x
ETC 排放限值	4.00	0.55	0.03	2.00
基准油品	1.270	0.060	0.016	1.67
1 号剂	1.193	0.062	0.018	1.72
2 号剂	1.243	0.058	0.019	1.53

注:①台架试验的不确定度为 5%;②ESC 排放限值及 ETC 排放限值取自 GB 17691—2005《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)》,第 7.2 章节对气态污染物、颗粒物和烟排放的规定,国Ⅴ阶段柴油机试验限值。

表 3 控制排气污染物排放结果平均变化率 %

催化器后	CO	THC	PM	NO _x
1 号剂平均变化率	-26.86	6.283	12.09	6.46
2 号剂平均变化率	-16.41	-10.18	32.92	-3.86

通过试验数据可知,基准油即国六标准柴油,在国Ⅴ标准柴油发动机上燃烧,排气污染物限值达到排放标准。

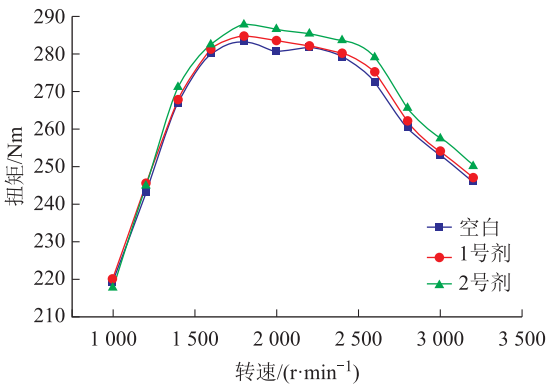
加入两种柴油添加剂的油品 ETC 排放结果都达标;加入 1 号柴油添加剂的油品 ESC 排放结果 NO_x 项目超标;加入 2 号柴油添加剂的控制排气污染物排放结果平均变化率显示,CO、THC 和 NO_x 排放数值有明显下降,说明 2 号柴油添加剂对 CO、THC 和 NO_x 有较好的抑制作用。

总体而言,柴油添加剂能够降低柴油机排放的 CO 和 THC 等不完全燃烧产物,但对 NO_x 和 PM 存在负面影响。从原理上分析,加入柴油添加剂后促进 CO、THC 数值降低,说明燃料充分燃烧了;因充分燃烧,升高了缸内温度,柴油机内局部富氧区域可能产生比原来更多的 NO_x;而柴油机内局部缺氧区域则可能产生比原来更多的 PM。

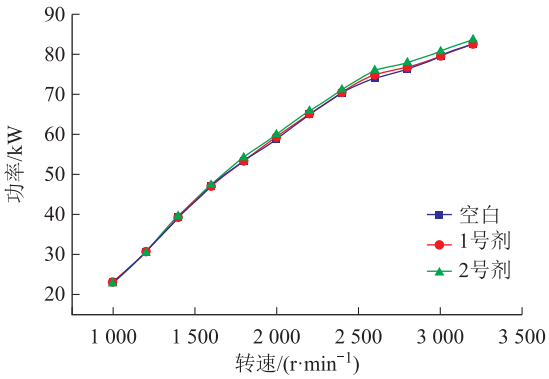
相关研究表明,在平均车速较低的城市工况下,NO_x 排放往往能达到限值的 2~3 倍左右,远远高于排放限值。其原因是城市行驶多为低速、低功率工况,排气温度较低,而现有选择性催化还原系统(Selective Catalyst Reduction,SCR)在温度低于 280℃时转化效率会严重降低,在低于 200℃时会停止工作,从而造成实际 NO_x 排放严重超标^[5]。

2.2 动力性——总功率增加率

通过对比加剂前后发动机最大扭矩和功率的变化,评估添加剂对柴油机动力性的影响,试验结果如图 3 所示。



(a)加剂后发动机最大扭矩变化曲线



(b)加剂后发动机功率变化曲线

图 3 发动机最大扭矩和功率曲线

由图 3 可见,加剂后柴油机的扭矩和功率都得到了提升。其中 2 号剂的扭矩提升幅度更为明显。

1 号剂在不同转速下,总功率增加率如表 4 所示。2 号剂在不同转速下,总功率增加率如表 5 所示。

表 4 1 号剂总功率变化

转速/(r·min ⁻¹)	原功率/kW	加剂功率/kW	增幅/%
3 200	82.308 2	82.739 3	0.523 7
3 000	79.484 1	79.799 0	0.396 2
2 800	76.300 0	76.783 8	0.634 1
2 600	74.162 9	74.871 8	0.955 9
2 400	70.157 9	70.405 5	0.352 9
2 200	64.822 1	64.990 9	0.260 3
2 000	58.817 5	59.377 1	0.951 3
1 800	53.335 9	53.642 9	0.575 5
1 600	46.924 8	47.151 8	0.483 8
1 400	39.193 9	39.347 2	0.391 1
1 200	30.583 3	30.867 8	0.930 0
1 000	23.003 0	23.085 1	0.357 0

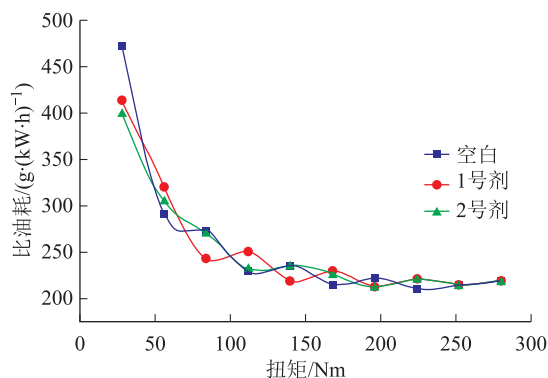
表5 2号剂总功率变化

转速/(r·min ⁻¹)	原功率/kW	加剂功率/kW	增幅/%
3 200	82.308 2	83.809 0	1.823 3
3 000	79.484 1	80.877 5	1.753 1
2 800	76.300 0	77.863 8	2.049 6
2 600	74.162 9	76.002 8	2.480 9
2 400	70.157 9	71.248 5	1.554 5
2 200	64.822 1	65.809 9	1.523 9
2 000	58.817 5	60.079 7	2.145 9
1 800	53.335 9	54.251 5	1.716 6
1 600	46.924 8	47.355 8	0.918 4
1 400	39.193 9	39.726 7	1.359 5
1 200	30.583 3	30.792 1	0.682 6
1 000	23.003 0	22.809 0	-0.843 5

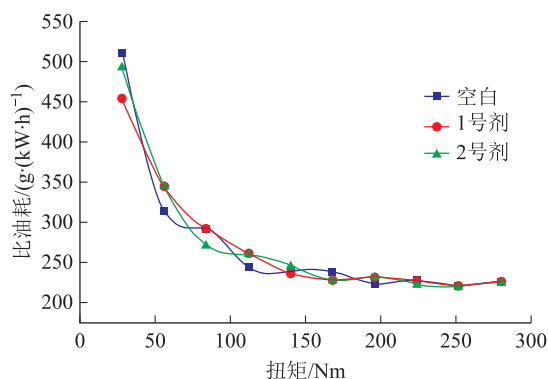
由以上数据可知,1号剂的动力性略有增加,增幅不明显;2号剂的动力性,在2 000,2 600,2 800 r/min时总功率增加率 $\geq 2\%$,增幅较明显。

2.3 燃油经济性——台架节油率

油耗率,或称比油耗(BSFC)是衡量柴油机油耗水平的关键参数,通常由负荷特性试验测得。图4(a)是转速为1 940 r/min时不同扭矩时柴油机的油耗率,图4(b)是转速为2 400 r/min时不同扭矩时柴油机的油耗率。



(a) 转速1 940 r/min时发动机油耗率曲线



(b) 转速2 400 r/min时发动机油耗率曲线

图4 发动机比油耗曲线

由图4可见,添加剂使柴油机在较低扭矩时的油耗率略微降低,且在50~100 Nm的范围内具有较为明显的节油效果。其中1号剂在中低转速时节油效果较好;2号剂在中高转速时节油效果较好。实际车辆行驶时,柴油机大多数时间都在中等转速运行,因此添加剂可在车辆常用工况下降低油耗。

为简明清晰说明添加剂的效果,首先定义尾气主要成分变化率,由试验数据按式(1)计算:

$$\text{变化率} = \frac{\text{加剂值} - \text{原始值}}{\text{原始值}} 100\% \quad (1)$$

变化率为负值,说明加剂后某成分减少;变化率为正值,说明加剂后某成分增加。

图5、图6分别为CO₂和CO的变化率。图中冷暖色代表不同水平的变化率,具体数值参见图右侧的标尺。黑色圆点为典型车辆在市区行驶时发动机转速扭矩的统计值。

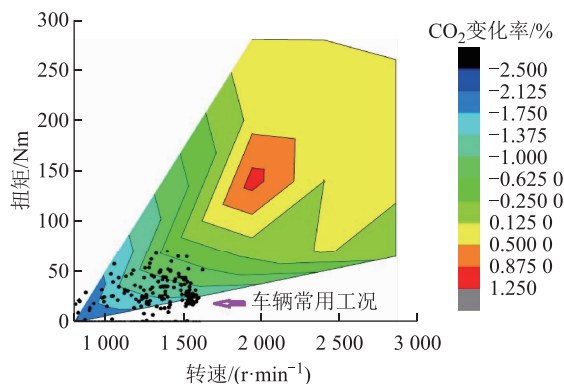
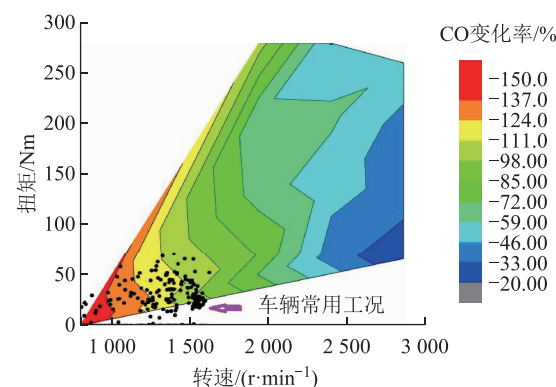
图5 CO₂变化率

图6 CO变化率

由图5可见,在车辆常用工况分布的范围内,加剂后CO₂排放量均有不同程度的下降。由图6可见,加剂后CO在常用工况范围内显著降低,降幅约为100%~150%,说明加剂后燃烧更加充分,具有节油减排的效果。由于CO₂排放量跟油耗正相关,因此说明加剂后在市区工况运行时可获得0.5%~2%的节油效果。

2.4 喷嘴清洁度——空气流量损失率

喷油器是柴油机中制造精度要求最高的零部件,其流通性能是影响柴油机各项指标的关键因素,通过小尺寸喷孔和高喷射压力的配合,得到细小的液滴以期加速油气混合。喷孔处因温度较低,残留的柴油发生缓慢氧化,易出现沉积物,造成喷孔流通性能降低,柴油雾化不良,最终表现为柴油机的各项性能下降。为了评价燃料,特别是添加剂对喷嘴结焦的抑制作用,需使用标准柴油机在发动机台架上开展试验,在柴油机试验前后测量喷嘴针阀在不同升程时的气体流动损失,以确定燃油的结焦倾向或添加剂的抗结焦作用。

本试验委托中石化石油化工科学研究院进行,发动机型号:PSA XUD9 A/L 非直喷柴油发动机。试验柴油:基准油 DF-3。

试验前将清洁的经过流量测量的喷嘴安装在发动机上,试验在4个阶段循环工况下运行10 h 3 min,试验结束后再次测量喷嘴空气流量。试验前、后喷嘴空气流量的变化即反映了试验后喷嘴的结焦程度。测得数据见表6。

表6 空气流量损失率

针阀升程/ mm	流量损失平均值/%		
	油品1 (空白油)	油品2 (1号剂)	油品3 (2号剂)
0.1	84.47	77.11	35.38
0.2	72.85	69.65	25.75
0.3	55.62	59.69	17.73

通过试验结果可知,加入1号柴油添加剂,柴油机的喷嘴空气流量损失率在59.69%~77.11%;加入2号柴油添加剂,柴油机的喷嘴空气流量损失率在17.73%~35.38%。流量损失平均值越小,喷嘴的结焦程度越低。加入2号剂的流量损失最低,说明柴油添加剂有较好的抑制喷嘴结焦堵塞的作用。

3 结 论

1)选择满足国V排放标准的中型车用柴油机,燃

用国六标准的车用柴油开展台架试验,反映了“老机烧新油”的现象,研究结果表明“老机烧新油”可以达到现有排放限值要求,符合国家对机动车污染物排放的环保要求。

2)本项目试验结果显示柴油添加剂对不同污染物排放数值的影响不同,添加剂能够降低柴油机排放的CO和THC等不完全燃烧产物,但对NO_x和PM存在负面影响,从原理上分析,加入柴油添加剂后促进CO、THC数值降低,说明燃料充分燃烧了,因充分燃烧,升高了缸内温度,柴油机内局部富氧区域可能产生比原来更多的NO_x;而柴油机内局部缺氧区域则可能产生比原来更多的PM。试验结果表明,加入本项目试验用柴油添加剂的机动车污染物排放数值总体符合当前GB 17691—2018《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》排放标准。

3)加入柴油添加剂可显著降低柴油机喷嘴沉积物,有较好的抑制喷嘴结焦堵塞的性能,有利于抑制柴油机的性能老化。

4)柴油添加剂有较明显的提升动力性能和降低油耗的效果。

参 考 文 献

- [1] 郑妍妍,唐强,王铁峰,等.聚甲氧基二甲醚的研究进展及前景[J].化工进展,2016,35(8):2412-2419.
- [2] 生态环境部.2018年中国机动车环境管理年报[EB/OL].(2019-04-09)[2020-10-09].http://www.gov.cn/guoqing/2019-04/09/content_5380744.htm.
- [3] 周华.复合柴油添加剂的制备及其对柴油燃烧性能的影响[J].开封大学学报,2018,32(2):84-87.
- [4] 苏慧君.柴油添加剂的发展现状及趋势[J].精细石油化工进展,2018,19(1):46-49.
- [5] 赵国斌,盖永田,耿帅,等.WHSC/WHTC与ESC/ETC测试循环的试验比较与研究[J].汽车工程学报,2015,5(1):29-34.

(收稿日期 2020-11-05)

(编辑 王蕊)