

国六轻型客车的催化器选型及匹配

张传良

(厦门金龙旅行车有限公司, 福建 厦门 361006)

摘要:催化器的选型和匹配是确保整车满足国六排放标准的重要环节之一。本文以某国六汽油轻型客车开发为例,通过催化器的选型和匹配、发动机电控系统标定及验证测试,最终确定最优的国六排放控制方案。

关键词:轻型客车; 汽油机; 国六排放; 催化器

中图分类号:U469.11; TK411⁺.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-3331(2024)06-0031-05

Selection and Match of Catalytic Converters Model for National VI Light Buses

ZHANG Chuanliang

(Xiamen Golden Dragon Bus Co., Ltd., Xiamen 361006, China)

Abstract: The selection and match of the catalytic converter model are important links to ensure that the entire vehicle meets the National VI emission standards. This paper takes the development of a light bus with National VI gasoline as an example. Through the model selection and match of the catalytic converter, calibration of the engine electric control system, and verification testing, the optimal scheme of National VI emission control is ultimately determined.

Key words: light bus; gasoline engine; national VI emission; catalytic converter

我国轻型汽车从2020年7月1日起实施国六a排放标准,从2023年7月1日起实施国六b排放标准,后者对气体污染物限值要求更高,并提高了颗粒物的限值要求^[1],而催化器是满足国六排放标准的关键配置之一。其中贵金属的含量与比例是影响催化净化效果的主要因素^[2]。为了降低成本,车企都在不断研究铂(Pt)、钯(Pd)、铑(Rh)的组合配比,力求既能降低贵金属总含量,又能有效地控制CO、HC和NO_x的最终排放量。另外,催化器的结构和布置形式也会影响催化剂的转化效率。因此需要综合考虑上述因素,以找到适配车型的最佳方案^[3-5]。

由于M₂类轻型客车的整车重量、发动机排量、布置空间等与M₁类汽车有差异,目前行业对其分析相对较少,本文对一款M₂类客车(该车搭载1.998 L排量的汽油发动机)的催化器进行选型和匹配,以达到国六排放标准的要求。

1 催化器选型及布置

催化器的主要作用是在催化剂的作用下将排气中的有害成分(HC、CO、NO_x等)转化成CO₂、H₂O、N₂等无污染的成分^[6]。此外,为满足国六标准对颗粒物PN的排放要求,还必须增加颗粒捕集器。

1.1 催化器结构

催化器由催化剂、载体(涂层)、减震层和壳体等组成。常见的催化器外形结构有圆柱形、椭圆形、跑道形;布置结构有单级、两级、多级和一级多段型。参考行业相关设计要求,催化器体积与发动机排量的比值一般为0.8~1;颗粒捕集器体积与发动机排量的比值一般为0.9~1.3^[7]。本文轻型客车的催化器体积设计为1.92 L,与发动机排量的比值为0.96;颗粒捕集器体积设计为2.45 L,与发动机排量的比值为1.23。两者均符合常规设计要求。为便于整车布置,

收稿日期:2024-05-24。

第一作者:张传良(1987—),男,工程师;主要从事动力总成设计开发工作。E-mail:15960380270@163.com。

该催化器设计成圆柱形的单级结构,将催化器和颗粒捕集器紧密耦合封装在同一个壳体内,外形如图1所示。

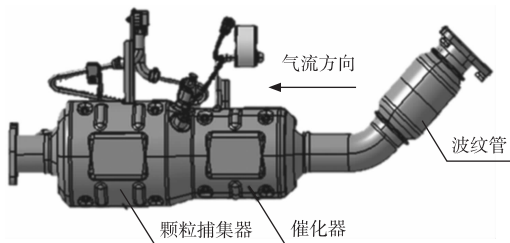


图1 催化器和颗粒捕集器外形

1.2 载体材料及体积

载体材料主要有金属和陶瓷两大类。其中金属载体热容小、温升快,有利于催化器快速起燃,但其保温性能不如陶瓷载体。陶瓷载体的热容大,保温性能好,一旦起燃能保持高的工作温度,从而提高转化效率^[8]。此外,陶瓷载体成本较低,因而被广泛应用。本文轻客同样使用陶瓷载体。

载体孔数的常见规格有300目、400目、600目和750目等。载体孔密度越大,壁越薄,载体的表面积就越大,催化剂的起燃时间就越短,国六排放阶段载体孔数一般选用600目或750目,形状为蜂窝状。根据设计经验,载体体积与发动机排量的比值一般在0.5~1之间^[9]。该轻型客车的催化器载体体积为1.519 L,与发动机排量的比值为0.76,符合经验设计要求。

1.3 催化剂

常用的催化剂有Pt、Pd、Rh等贵金属。其中Pd易受铅的侵蚀,Pt易受热劣化。Pt、Pd主要是催化氧化CO和HC;Rh主要是催化还原NO_x。近年来贵金属价格呈上升趋势,且价格波动较大,各贵金属之间的含量配比要根据贵金属期货市场进行调整,以平衡成本。在满足排放要求的前提下,应简化配方,最大限度降低成本。对不同的Pt、Pd、Rh组分方案进行排放试验测定和分析,以确定最佳配比。

实际工程中,常用不同比例组分的Pt、Pd催化氧化HC和CO(当Pt与Pd的质量比为1:0时,单独使用Pt,当Pt与Pd的质量比为0:1时,则单独使用

Pd);另外再使用Rh催化还原NO_x。Pd的热稳定性较好,但抗中毒能力不如Pt。通常在只有单级催化器且无颗粒捕集器的排气系统中,才会使用Pd、Pt、Rh组合,其贵金属成本相对较高;综合贵金属成本考虑,在有催化器和颗粒捕集器的排气系统中,催化器多采用Pd和Rh组合,颗粒捕集器多采用Pt和Rh组合。据统计,大多数催化器贵金属Rh与Pd的质量比在1:15~1:5之间,颗粒捕集器贵金属Rh与Pt的质量比在1:2~1:1之间,贵金属总含量在1.06~3.69 g。催化剂的正常工作温度一般在300℃以上^[10]。本文催化器贵金属Rh与Pd的质量比为1:5,颗粒捕集器贵金属Rh与Pt的质量比为1:2。

1.4 涂层材料及涂敷方式

1) 涂层材料组成。涂层主要包括氧化铝、助催化剂、稳定剂和催化剂等。其中,涂层材料附着在蜂窝状的金属或陶瓷载体表面,以增加反应气体与催化剂的接触面积,提高催化剂的反应效率^[11]。

2) 涂层材料涂敷方式。涂层材料的涂敷方式很大程度上影响着催化器的起燃特性。目前主要的涂敷方式有平均涂敷和分段涂敷。平均涂敷的工艺简单,但尾气组分和排气温度随着径向和气流方向不断变化,催化器不能完全发挥作用;分段涂敷既能在气流方向充分发挥催化剂的作用,又能降低催化剂的用量,但其工艺较复杂。根据现有布置,本文选用分段涂敷;选用比表面积大、孔结构好的陶瓷蜂窝材料,使催化剂成分均匀分布,既能改善催化剂的起燃特性,又能减少催化剂的用量。

1.5 催化器总成安装布置

如果催化器总成的安装位置距离发动机排气口位置太远,会影响催化器的起燃时间。因此,布置催化器总成时应尽量靠近发动机排气歧管处,使其能快速起燃。当发动机高负荷运行时,受排气高温的影响,导致催化剂热失活和烧结,加速了催化剂的热劣化,影响其使用寿命,因此需要提高催化器的耐热性。

由于轻型客车的发动机舱位于驾驶室下方,空间较为密闭,若采用催化器与排气歧管紧耦合+单独颗粒捕集器的布置方式,催化器冷却环境较差,发动机较大负荷运行之后会导致催化器出现烧红的情况,高

温催化器通过驾驶舱中座椅底部盖板导热,使驾驶舱内温度同步升高(在WLTC工况排放测试过程中,催化器入口端排气最高温度为1 024 ℃),因此必须采用耐受温度高达1 100 ℃的载体和涂层材料,该布置方式会增加零部件成本。

所以本文采用底盘下安装布置形式,将催化器与颗粒捕集器紧密耦合在一起,如图1所示。同时尽量缩短催化器进气口与发动机排气口的距离,以缩短起燃时间。该车型的催化器进气口与发动机排气口距离为321 mm,满足 ≤ 500 mm的设计要求。

通过WLTC循环试验,对底盘下布置形式和排气歧管紧耦布置形式的排气温度进行测试比较。在冷启动工况和高速工况瞬态下,测定催化器入口端排气最高温度,结果见表1。结果表明,催化器布置在底盘可明显降低高速工况瞬态排气最高温度,排气温度低于催化器的耐受温度;而且底盘下布置形式也能解决机舱内温度过高的问题。

表1 催化器入口端排气最高温度测试结果

测试工况	排气温度/℃	
	底盘下布置	排气歧管紧耦布置
冷启动工况	314	441
高速工况瞬态	829.7	1 024

1.6 整车排放初测试

催化器开发前,先测试其所匹配车辆未装催化器和颗粒捕集器时的排放情况,确定各污染物含量,为贵金属配方设计提供依据。测试结果显示:CO为309.2 mg/km,HC为2 576.6 mg/km,NO_x为101.2 mg/km,PM为6.76 mg/km,PN为 14.25×10^{11} 个/km。本次设计了3组不同的贵金属含量方案(方案一总量为1.818 g;方案二总量为1.228 g;方案三总量为1.067 g;催化器贵金属Rh与Pd的质量比为1:5,颗粒捕集器贵金属Rh与Pd的质量比为1:2)进行对比试验,试验结果见表2。

表2 三种贵金属方案排放测试结果

排放 污染物	排放限值 (国六b)	劣化修 正值	方案一		方案二		方案三	
			实测值	限值比例	实测值	限值比例	实测值	限值比例
THC	80 mg/km	16 mg/km	38.7 mg/km	68.4%	79.2 mg/km	119.0%	107.5 mg/km	154.4%
CO	740 mg/km	110 mg/km	219.8 mg/km	44.6%	656.6 mg/km	103.6%	1 696.2 mg/km	244.1%
NO _x	50 mg/km	15 mg/km	18.5 mg/km	67.0%	29.2 mg/km	88.4%	11.4 mg/km	52.8%
NMHC	55 mg/km	10 mg/km	34.7 mg/km	81.3%	35.1 mg/km	82.0%	99.6 mg/km	199.3%
PM	3 mg/km	0 mg/km	0.4 mg/km	13.3%	2.2 mg/km	73.3%	2.76 mg/km	92.0%
PN	6×10^{11} 个/km	0 个/km	1.13×10^{11} 个/km	18.8%	1.31×10^{11} 个/km	21.8%	5.13×10^{11} 个/km	85.5%

注:要求限值比例 $\leq 90\%$,限值比例=试验结果/排放限值 $\times 100\%$,试验结果=实测值+劣化修正值。

方案一的排放结果能满足要求且有一定余量,但贵金属含量相对较高,不利于成本控制;方案二的排放结果略高于限值,但考虑通过发动机电控系统标定策略,仍有通过的可能性;方案三则过于激进,达到排放要求的可能性很小。

通过分析方案二的秒采数据,统计其在WLTC低、中、高和超高这四个速度段中的排放数据,发现CO和THC主要是在低速段超标(如图2和图3所示)。这是由于冷启动阶段发动机的空燃比小、温度低、燃料汽化着火条件差,从而导致燃烧不完全和形成缸壁淬冷层,导致CO和THC排放超标。该问题可

通过发动机电控系统标定,优化燃烧,提高催化器转化效率,使其满足国六b排放限值要求。

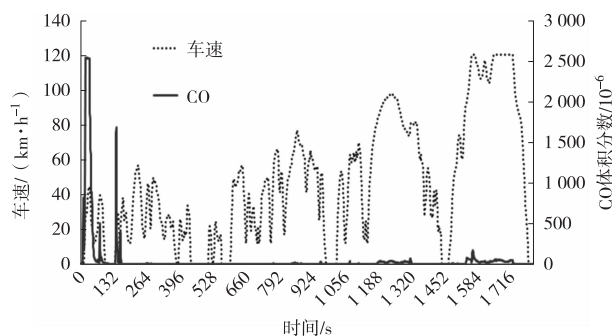


图2 WLTC测试CO秒采数据曲线

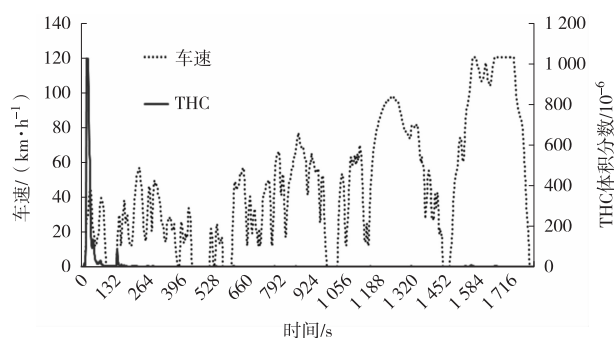


图3 WLTC测试THC秒采数据曲线

2 发动机电控系统标定

可通过发动机电控系统对喷油特性、点火提前特性、怠速控制特性等进行标定,以得到最佳控制参数。最佳控制参数可使催化器快速达到起燃温度,进而获得较高的转化效率,最终得到整车最佳的排放结果。

2.1 冷启动和暖机阶段标定

发动机在冷启动和暖机阶段,由于发动机水温低、燃油雾化不好、燃烧不充分,为保证启动成功会加浓混合气;此外,由于启动阶段排气温度较低,催化剂未能快速达到起燃温度,无法有效地进行催化作用,导致CO和HC排放量很高。80%左右的CO、HC排放集中在冷启动时的120 s内^[12]。由于发动机在冷启动和暖机阶段,催化器达到起燃温度的时间较长,催化效率低,故其对排气的净化效果不理想。针对催化器快速起燃,通常有以下三种措施:

1) 推迟点火提前角。通过推迟点火提前角,可以提高排气温度,从而达到加热催化器的目的。

2) 提高发动机怠速转速。提高发动机怠速转速能同时增加排气温度和进气量。排气温度与怠速转速及点火提前角的关系如图4所示,一般怠速转速高出稳态怠速转速的范围在300~500 r/min,否则会带来冲击和噪声。整车启动后可将怠速由800 r/min增加到1 200 r/min。

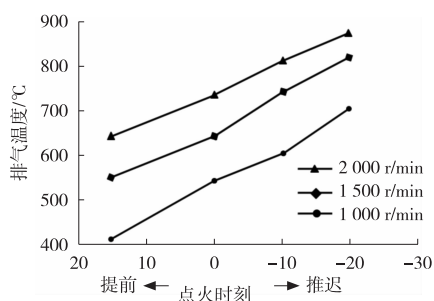


图4 发动机转速和点火时刻对排气温度的影响

3) 调整空燃比。在保证稳定燃烧,不影响怠速稳定性及车辆起步能力的情况下,可采用一定程度的稀燃,略稀的空燃比会减少测试循环中CO、HC的排放,尽量减少发动机的原始排放。

2.2 理论空燃比的控制

催化器在理论空燃比14.7的狭窄范围(14.7 ± 0.147)内才具备最佳的净化效果^[13],如图5所示。因此在整车运行工况中,需要精确控制发动机的混合气空燃比。为了更精确地控制空燃比,将前氧传感器由普通型传感器更换为宽氧型传感器。普通型氧传感器的工作特性是在理论空燃比附近信号电压突变,而在大于理论空燃比或小于理论空燃比的很宽的范围内,信号电压几乎不变。也就是说,这种在理论空燃比附近信号电压跃变的氧传感器,由于电压信号随时在变化且识别精度不高,只体现出混合气过浓和过稀两个信号变化,无法检测混合气偏浓或偏稀多少。而宽氧型传感器以理论空燃比(输出电压=0.45 V)为检测基准,不仅可以连续检测混合气偏浓(输出电压<0.45 V)和偏稀(输出电压>0.45 V)的数量,还可以在催化器净化率的高领域内对空燃比进行微调,从而更精确地控制排放^[14]。

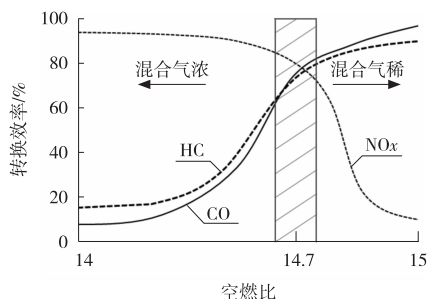


图5 三种污染物转化效率随空燃比的变化关系

3 试验验证

在台架上进行可变气门正时开启角度、充气效率、排气温度及爆震控制等标定;并将冷启动工况的空燃比参数由11.3调整为11.7,发动机到达闭环控制后,通过脉谱图将空燃比精确控制在14.7附近;怠速控制由800 r/min增加到1 200 r/min;点火提前角由 18° 调整为 16° 。采取上述标定策略优化后,仅对方案二重新进行整车排放测试,测试结果(表3)达到限值比例低于90%的目标,可一次性通过国六排放限

值要求。

表 3 方案二优化后的整车排气污染物测试结果

排放污染物	实测值	限值比例
THC	40.9 mg/km	71.1%
CO	307.3 mg/km	56.4%
NO _x	10.7 mg/km	51.4%
NMHC	37.1 mg/km	85.6%
PM	2.2 mg/km	73.3%
PN	1.24×10 ¹¹ 个/km	20.7%

4 结束语

本文通过分析国六标准对排气污染物限值的新要求,通过对某轻型客车的催化器进行选型分析和布置,预先设计了三种不同的贵金属含量方案,结合发动机电控系统标定并综合考虑贵金属成本因素,通过试验验证,使用最少的贵金属就能满足国六排放限值要求。

参考文献:

[1] 环境保护部. 国家质量监督检验检疫总局. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 18352.6—2016[S]. 北京:中国环境科学出版社,2016:1

[2] 刘苹,陈康. 基于国六排放法规的汽油车催化器贵金属方

案研究[J]. 机电信息,2022(22):33-37.

[3] 姚慧,李军,李传杰,等. 国六轻型车催化转化器应用现状的分析[J]. 汽车零部件,2023(1):83-87.

[4] 梅娜,肖宗禹,芦存树. 某车型三元催化器贵金属配比优化研究[J]. 专用汽车,2023(3):59-62.

[5] 李亮,曹梦,唐志刚,等. TWC 贵金属含量偏差对发动机排放的影响研究[J]. 内燃机与配件,2022(19):17-20.

[6] 唐颖青. 耦合式三元催化转化器设计研究[J]. 工程建设与设计,2022(17):135-140.

[7] 丁蓉蓉,王量. 某轻型汽油车国六排放后处理开发研究[J]. 汽车实用技术,2018(8):70-73.

[8] 杜传进,董力平,颜伏伍,等. 车用排气催化转化器与发动机的匹配[J]. 车用发动机,1999(5):10-13.

[9] 袁观练,余光耀,李高坚. 轻型汽油车国六排放匹配研究[J]. 内燃机与配件,2022(5):46-48.

[10] 陈家瑞. 汽车构造[M]. 北京:机械工业出版社,2005:196.

[11] 张少洪,郭振杰. 三元催化转换器的构造作用及使用须知[J]. 汽车运用,2005(1):43.

[12] 吴锋,石祥义,严降龙,等. 发动机冷起动污染控制技术研究[J]. 汽车技术,2002(12):20-22.

[13] 涂安全. 标定技术在汽油机排放控制中的应用[J]. 汽车工程师,2011(9):45-47.

[14] 邓永龙. 汽车发动机氧传感器原理及数据诊断分析[J]. 内燃机与配件,2022(9):54-56.

(上接第 14 页)

[6] 郁淑聪,孟健,张渤. 浅谈汽车智能座舱发展现状及未来趋势[J]. 时代汽车,2021(5):10-11.

[7] 刘涵昱,时瑞浩,蒋建辉. 5G 通信时代汽车智能座舱发展趋势探讨[J]. 广东交通职业技术学院学报,2021,20(1):33-37.

[8] 涂少碧. 汽车智能座舱内部的“传感之道”[J]. 电子产品世界,2021,28(6):25-27.

[9] 杜曾宇,黄晓延,蒙锦珊. 智能座舱的关键技术[J]. 时代

汽车,2021(5):143-144.

[10] 任广乐,赵帼娟,李立安. 一种双 SoC 智能座舱域控设计[J]. 汽车实用技术,2021,46(19):23-27.

[11] 边旭东,张亦弛,谢卉瑜. 浅谈智能座舱的“一芯多屏”[J]. 时代汽车,2021(6):12-14.

[12] 国家发展和改革委员会. 车载音视频系统通用技术条件:GB/T 26775—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2012:4.