

新一代柴油机节能减排技术方向探析

占惠文

(湖北交通职业技术学院 航海学院, 湖北 武汉 430050)

摘 要:新一代柴油机需要在动力性、经济性和净化性等方面达到最佳均衡。文章以欧 VI 排放法规为导向,以节油为目标,汲取发动机最新科研成果,分析我国新一代柴油机实现节能减排的技术方向,并从实现综合油耗和排放性能最佳折衷的角度,探讨所需开展的研究工作。

关键词:柴油机;节能减排;技术方向;欧 VI

中图分类号:TK421

文献标识码:A

文章编号:1671-9891(2017)04-0033-05

0 引言

新一代柴油机指满足欧 VI 以及美国 2010 排放法规要求的柴油机,是相对于欧 IV、欧 V 柴油机而全新设计开发的机型。目前,欧美已基本解决了新一代柴油机的排放控制问题,进一步降低综合油耗成为其主要开发目标。欧美新一代柴油机主要采取了废气再循环(EGR)、催化型颗粒捕集器(cDPF)和选择性催化还原(SCR)技术组合路线来解决排放问题。虽然该技术方案在降低柴油机综合油耗方面面临巨大挑战,但其裸机经济性领先的事实,说明即便采用这一技术方案,欧美国家所设计生产的发动机在经济性方面仍具有很强的市场竞争力。

法规是柴油机上市的门槛,省油是巩固市场份额的重要技术保障。笔者认为,新一代柴油机的核心目标需定位于动力性、经济性、净化性、可靠性和耐久性,在满足法规要求的前提下谋求性能的全面与均衡。本文将以欧 VI 排放法规为导向,以节油为目标,汲取发动机单元技术的最新科研成果,分析我国新一代柴油机研发的技术方向,并从实现综合油耗和排放性能最佳折衷的角度,探讨所需开展的研究工作。

1 新一代柴油机应用 cDPF 的必然性

1.1 法规限制颗粒数量

除颗粒质量比排放以外,更严格的法规对柴油机排放的颗粒数量也设定限值,要求每公里或每千瓦功率输出所产生的颗粒数不高于 10^{11} ,所有粒径超过 23 nm 的颗粒将纳入计数。^[1]

1.2 柴油机颗粒物的粒径分布

Kittelson D.B.等人将柴油机排放的颗粒按粒径尺寸分为三种形态:核模态($5\text{ nm} < D_p < 50\text{ nm}$)、聚积态($100\text{ nm} < D_p < 300\text{ nm}$)和粗颗粒($D_p > 1\text{ }\mu\text{m}$)。核模态颗粒仅占颗粒物总质量的 1%~20%,但粒数权重超过 0.9,较大部分质量的颗粒属于聚积态,该形态颗粒物的粒数权重比较稳定,粗颗粒对于粒数权重几乎没有影响,但对颗粒物的总质量有 5%~20% 的贡献。柴油车车载排放测试结果也表明,300 nm 以下粒径的颗粒数占总粒数的 99% 以上。^[2]

1.3 选择 cDPF 的必然性

柴油机裸机排放的颗粒数通常处于 $1 \times 10^{13}/\text{km}$ 的水平, $5 \times 10^{11}/\text{km}$ 的法规限值意味着在数量上柴油机排放的颗粒物中应有 95% 以上被过滤。颗粒氧化催化器(POC)之类的过滤器不再胜任, cDPF 必将成为新一代柴油机的必备单元技术。

收稿日期:2017-04-22

作者简介:占惠文(1977—),男,湖北红安人,湖北交通职业技术学院航海学院讲师,硕士。

2 SCR 技术的负面影响

围绕我国新一代柴油机国 VI 的解决方案这一问题,SCR 与 eDPF 组合的技术路线受到多方青睐,多家后处理厂商针对国 VI 柴油机开发提出“预氧化催化器(DOC)、颗粒捕集器、水解催化器、SCR 催化器和氨气后氧化催化器”的组合方案。从技术方案的综合能力来看,采用该方案的柴油机有望达到国 VI 排放目标,但是发动机的经济性指标将面临巨大挑战。在 eDPF 的应用不可避免的前提下,需要权衡继续引入 SCR 技术将产生的正面影响和负面影响。鉴于 SCR 技术对 NO_x 的去除能力已达成共识,以下主要分析该技术所产生的负面影响。

2.1 比油耗升高

柴油机加装 SCR 催化器将使泵气损失增大,导致比油耗升高。例如,某排量为 11 L 的柴油机外特性试验表明,加装 1.9 倍排量的 SCR 催化器后排气背压全面升高,比油耗相对裸机升高了 1.1%~3.8% 不等。eDPF 的“强制性”引入必将导致排气背压升高,且其主动再生过程需要额外的燃油消耗,因此 eDPF 本身已成为发动机燃油经济性提升的负担,在这一前提下继续引入 SCR 技术恐将难以维持现有的油耗水平。

2.2 重型商用车燃料消耗量限值

对于新认证车型,我国于 2012 年 7 月 1 日起执行了燃料消耗量的行业标准,即《重型商用车燃料消耗量限值(第一阶段)》(QC/T 924—2011),推动新一代柴油机燃油经济性的提升。SCR 技术的应用通常以燃烧优化为前提,从而表现出可降低燃油消耗的优势。但用户所关注的燃料成本包括燃油成本和“添蓝”(Ad-blue)成本,追求综合油耗(将添蓝消耗折算为柴油消耗)最低已成为必然趋势。新一代柴油机应用 SCR 和 eDPF 的组合方案需要若干催化器的辅助,泵气损失的进一步增大必将导致发动机综合油耗的持续攀升。为规避符合了法规要求而丢掉了市场的风险,我国新一代柴油机将不会选择综合油耗恶化的排放控制方案。

3 应用低温燃烧的必要性

3.1 柴油机排放物生成的必要条件

NO_x(氮氧化物)、soot(碳烟)、CO(一氧化碳)和 HC(碳氢化合物)是柴油机排放的主要污染物,利用当量比(φ)-绝热火焰温度(T)图可方便地分析上述物质生成的必要条件,如图 1 所示。

图 1 表明 $\varphi > 2$ 且绝热火焰温度 $T \in [1500\text{K}, 2500\text{K}]$ 是 soot 生成的必要条件,而 $\varphi < 2$ 且 $T > 2200\text{K}$ 则是 NO_x 生成的必要条件,NO_x 和 soot 的浓度在生成区域内存在梯度。柴油机预混燃烧阶段属于过浓燃烧,注定生成 CO 和 HC,但两者的比排放还取决于在扩散燃烧阶段被氧化的程度。CO 和 HC 的氧化程度主要受制于氧气和火焰温度两个因素,提高扩散燃烧阶段油气混合的速率可为两者氧化提供更好的氧条件,控制燃烧末期合理的火焰温度则为两者的氧化提供温度条件。图 1 表明,在 $\varphi \leq 1$ 的条件下,1400K 以上的绝热火焰温度可促使两者快速氧化,而在 $\varphi > 1$ 的条件下,促使两者快速氧化的温度边界随 φ 的升高向高温区偏移。

基于上述分析,可在 φ - T 图上标出柴油机有望实现清洁燃烧的区域,该区域的横纵坐标分别对应绝热火焰温度 $T \in [1400\text{K}, 2200\text{K}]$ 和当量比 $\varphi < 2$,如图 2 所示。

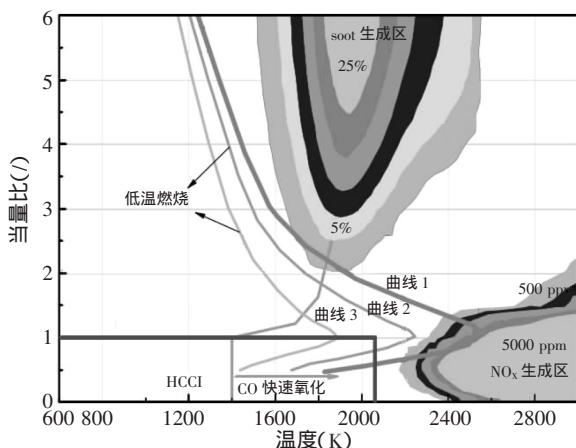


图 1 柴油机燃烧历程 φ - T 图

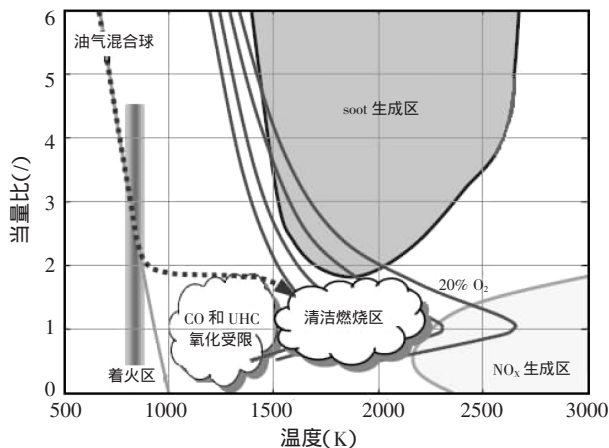


图 2 柴油机清洁燃烧区

3.2 低温燃烧改变了能量分配

柴油机常规燃烧模式的传热损失较高,而低温燃烧具有燃烧历程绝热火焰温度低的显著特征,对外界的传热损失明显减少,使可用功增多。

活性控制压燃(RCCI)模式属于低温燃烧的一种具体形式,以其为例论述低温燃烧对能量流的改变情况。SL Kokjohn 等人对 RCCI 和柴油常规燃烧两种模式进行了分析,研究了燃烧模式对能量分配的影响,认为燃烧模式对燃料化学能的分配产生了重要影响,如表 1 所示。RCCI 模式的传热损失远低于常规燃烧模式,同时由于低温燃烧的实现需要控制燃烧速率,RCCI 模式的燃烧效率略有下降,而为保证 CO 和 HC 的氧化程度,在燃烧后期维持了适宜的燃烧温度,因此两种燃烧模式的排气内能没有出现太大的差距。鉴于传热损失的降幅远大于燃烧损失的下降,RCCI 模式使发动机的指示效率明显升高。^[3]

表 1 RCCI 燃烧和常规燃烧模式的能量平衡预测值

	RCCI	柴油常规燃烧
指示效率/%	54.3	47.6
燃烧损失/%	1.3	0.3
传热损失/%	10.9	19.1
排气内能/%	33.4	33.0

3.3 低温燃烧存在高效清洁的空间

在图 1 中,曲线 1 表征柴油机常规燃烧模式的绝热火焰温度演变历程,曲线穿越 soot 和 NO_x 的生成区域,止于 CO 快速氧化区,因此 soot 和 NO_x 成为柴油机主要的有害排放物质。图 1 中曲线 2 和曲线 3 曲线分别表征不同的低温燃烧模式下绝热火焰温度的演变历程,两条线均避开了 soot 和 NO_x 的生成区域,止于 CO 快速氧化区。曲线 1、曲线 2 和曲线 3 等三条曲线对应的绝热火焰温度依次降低,为降低散热损失提供了温度的条件。

前文通过对柴油机排放物生成条件的分析,已在 φ -T 图上形成了清洁燃烧的集合。燃烧模式影响能量流的分析表明,合理地降低燃烧火焰温度有助于提高发动机的热效率。在 φ -T 图上,提高热效率所需的火焰温度与清洁燃烧的集合存在交集,因此相对于柴油机常规的燃烧模式,低温燃烧存在高效清洁的燃烧空间。

4 高效清洁的燃烧路径

低温燃烧为柴油机高效清洁燃烧研究提供了技术方向, φ -T 图分析也指明了实现高效清洁燃烧的当量比的条件和绝热火焰温度的条件。分析柴油机常规燃烧的路径有助于探索高效清洁燃烧可能的实现方案。

4.1 柴油机常规燃烧路径

柴油机常规燃烧路径从时间历程上可分为三个阶段,如图 3 所示。

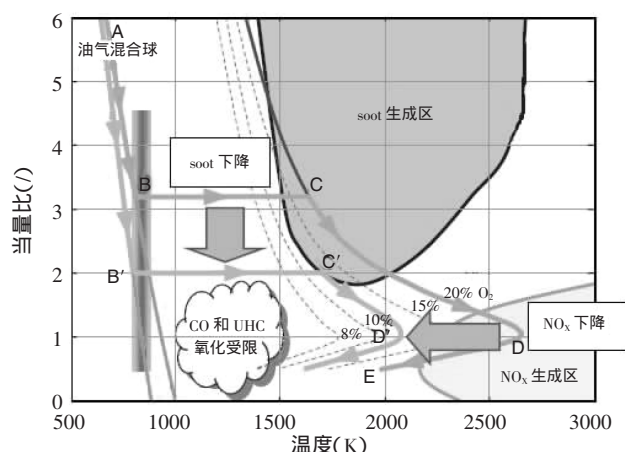


图 3 柴油机常规燃烧路径

预混合气形成阶段(A 到 B):从喷油开始到自燃开始。预混合气形成过程主要受油气混合速率控制,油气混合状态直接影响随之的燃烧过程。

预混燃烧阶段(B 到 C):从燃烧开始到喷油结束。预混燃烧阶段主要受油气混合物热力学状态的控制,具有“浓的预混合燃烧”特征,燃油质量传递和化学反应速率极快,导致火焰温度快速进入 soot 生成区域。

扩散燃烧阶段(C 到 E):从喷油结束到燃烧结束。预混燃烧阶段生成的 CO、soot 及剩余燃油发生扩散燃烧,该过程主要受油气混合速率的控制。C 到 D 是燃烧扩散至整个燃烧室的过程,火焰温度持续升高并进入 NO_x 生成区。D 到 E 是燃烧末期,随当量比和放热率的下降以及活塞下行,燃烧温度降低。

4.2 高效清洁燃烧路径

(1)HCCI 的缺陷。HCCI 是早期提出的一种低温燃烧模式,关于其技术难点已有很多论述。柴油机全面实现均质压燃几乎是不可能的。在 ϕ -T 图(图 1)中 HCCI 模式对应左下角的一个区域,不妨将该区域假设为一个点。柴油机负荷之间油气的差异导致燃烧历程的 ϕ -T 坐标比较分散,将众多分散的点逼近一个给定的点(HCCI)不是标定、优化所能实现的,这可能需要不同的硬件条件,具体到发动机上则为需要不同的总成模块。事实上,包括 HCCI 在内的众多燃烧模式都存在一个致命的缺陷,即只能适用于一定的负荷范围。

(2)高效清洁燃烧的研究思路。在图 3 中直观地表达了燃烧路径的改变方向,即将预混燃烧阶段向低当量比推移,将扩散燃烧阶段向低温推移,采用 A-B'-C'-D'-E' 所示路径取代传统的燃烧路径。对于如何组织燃烧才能实现期望的燃烧路径,直喷式汽油机(GDI)的燃烧组织方案具有极其重要的参考价值。GDI 发动机在不同的转速和负荷区域采用了不同的燃烧模式。除奥迪之外,奔驰 M276DE35、丰田 D-4 型 GDI 发动机也采用了复合燃烧模式。^[4]

5 柴油机高效清洁燃烧技术方案

5.1 推荐的燃烧模式

国内高校的柴油机燃烧科研成果令人振奋。天津大学的鹿盈盈博士依据负荷划分,研究了单缸柴油机高效清洁燃烧的路径及所需的单元技术。鹿博士认为,中等负荷宜采用典型的低温燃烧模式,高负荷宜采用高密度低温燃烧技术,而低负荷宜采用预混低温燃烧技术。^[5]

5.2 净化性与经济性的折衷情况

(1)典型低温燃烧模式。在中等负荷,采用中高 EGR 率(20%~40%)、可变气门正时(VVT)和高度增压的组合方案,实现了经济性和净化性的平衡,指示热效率达到 45%左右,而 NO_x 比排放接近欧 限值。需要注意的是,采用海量 EGR(>60%)虽可将碳烟和 NO_x 降至极低水平,但将导致 CO 和 HC 大量增加,引起指示热效率的下降。

(2)高密度低温燃烧技术。在高负荷,基于高 EGR 率难以实现的特点,采用中等 EGR 率(约 35%)、VVT、高度增压和燃油灵活喷射的组合方案,实现了油耗与排放的折衷。

高密度低温燃烧的核心是充量热力学状态、组分和多尺度混合率的控制。高充量密度可抑制温升和促进油气混合,有效缩短了燃烧后期的持续时间,也是柴油机热效率提升的一个重要因素。在高负荷下,单缸机的指示热效率达到 49%,NO_x 比排放接近欧 限值。

(3)预混低温燃烧技术。在低负荷,采用燃油多段喷射和海量 EGR(>60%)的组合方案,实现了排放和油耗的折衷,指示热效率达到 45%左右,而 NO_x 比排放低于欧 限值。

5.3 新一代柴油机节能减排技术方案

高校探索了柴油机高效燃烧和清洁燃烧全面统一的可行性和潜力,企业需要制定切实可行的工程化方案,方能推动科研成果向产品的转化。工程化方案首先需要实现三种燃烧模式。从工程化的角度,实现三种燃烧模式需要提高燃烧全历程油气混合速率和控制燃烧温度的单元技术,针对负荷区间灵活地控制油气混合速率和燃烧温度从而实现高效燃烧和清洁燃烧的统一。

(1)提高油气混合速率的单元技术,具体包括以下几个方面。第一,高压小孔径燃油喷射技术。研究超高压共轨(轨压 $\geq 250\text{MPa}$)和小孔径油嘴的应用技术,改善喷雾质量,提高柴油的蒸发速率,采用 280MPa 以上的喷射压力有利于增大燃烧系统开发的回旋余地。第二,高增压技术。研究可变截面增压和两级增压技术,权衡增压能力和对燃油经济性的影响,确定适宜的增压方案。第三,燃烧室技术。高涡流比活塞在实现低温燃烧方面将具有重要作用。第四,燃油喷射策略。燃油喷射需突破常规的模式,将油气的快速混合作为主要

目标之一。另外,燃油进气道喷射与缸内直喷的组合应用模式也值得探索。

(2)控制燃烧温度的单元技术。控制进气温度和燃油温度可以控制油气混合物在着火时刻的温度,从而有效控制燃烧温度。控制燃烧温度的技术具体包括以下几个方面:第一,可变气门技术。从控制燃烧温度的角度,可变气门技术主要用于实现进气门晚关,配合高度增压技术,在保证进气量的前提下,降低压缩上止点处工质的温度,从而降低燃烧温度。该方案利用了米勒循环原理,比单纯降低压缩比具有优势。第二,EGR技术。EGR的实现有多种方案,但高EGR率的实现却是一个瓶颈问题。内部EGR虽然具有这方面的潜力,但极易增加燃烧温度控制的压力,因此从实现低温燃烧的角度来看,内部EGR不是一个优选方案。同样,电子节气门和文丘里管都存在节流损失。前文已提及新一代柴油机需要使用cDPF,这虽然导致油耗升高,却对高EGR率的实现提供了有利条件。因此有必要对此展开研究,寻求多方面的折衷。第三,高爆压。严格地说,提高爆发压力不能作为控制燃烧温度的方案,但是高EGR率需要配合高的爆发压力一起使用。高EGR率必将导致循环废气占据一定的气缸容积,为保证新鲜空气量需提高增压比,所以发动机的爆发压力会随之上升。第四,分层燃烧技术。实现工质组分、温度和浓度分层可以有效地控制燃烧速率,因此也是控制燃烧温度的重要技术途径,值得探索。

6 结束语

总体来说,新一代柴油机需要全面的技术提升,从设计、材料、零部件到整体的提升,而其核心是综合经济性的提升。排放法规是发动机技术进步的推动力量,需要重视法规的导向作用,从当前的实际出发,通过创新谋求长远的、可持续、超越的发展。

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(中国第五阶段)[S].北京:中国环境科学出版社,2013.
- [2]张远军.机动车颗粒物排放测试与研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
- [3]S.L.Kokjohn, R.M.Hanson, D A Splitter ,et al. Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): a pathway to controlled high-efficiency clean combustion[J].International Journal of Engine Research,2011(3):209-226.
- [4]刘峥,王建昕.汽车发动机原理教程[M].北京:清华大学出版社,2001.
- [5]鹿盈盈.重型柴油机低温燃烧及燃烧路径的研究[D].天津:天津大学,2012.

Exploratory Analysis of Technical Trends of Energy Saving and Emission Reduction for New Generation Diesel Engines

ZHAN Hui-wen

(School of Navigation, Hubei Communications Technical College, Wuhan 430050, China)

Abstract: Best equilibrium needs to be achieved in terms of its power, economy and cleanliness. Guided by Euro VI emission regulation with the objective of saving oils and referred to the latest scientific research outcomes, this article analyzes the technical trends of achieving energy saving and emission reduction for a new generation of diesel engines in China, and from the perspective of best compromise between total fuel consumption and emission level, it explores the needed research work.

Key words: Diesel Engine; Energy saving and emission reduction; Technical trend; Euro VI