

柴油机低温燃烧技术综述

张志强¹, 赵福全², 李理光³

(1. 东风柳州汽车有限公司, 广西, 柳州 545005; 2. 清华大学 汽车产业与技术战略研究院, 北京 100084;
3. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 针对柴油机低温燃烧技术特点, 将其研究成果和重点分成五个方面进行阐述, 低温燃烧特性研究、低温燃烧过程优化研究、低温燃烧方式中的有害产物生成特征研究、燃料特性对低温燃烧影响研究和低温燃烧闭环控制研究。在此基础上, 对低温燃烧技术进行展望和总结, 以期促进其发展, 并使柴油机更加满足节能和环保的要求。

关键词: 柴油机; 低温燃烧; 氮氧化物排放; 碳烟排放

中图分类号: TK421 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2016.04.01

A Review on Technologies of Low Temperature Combustion for Diesel Engines

ZHANG Zhiqiang¹, ZHAO Fuquan², LI Liguang³

(1. Dongfeng Liuzhou Motor Co., Ltd, Liuzhou 545005, Guangxi, China;
2. Automotive Strategy Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: There have been research efforts that focused on low temperature combustion and its applications, which is one of the newest diesel combustion modes and meets the needs of diesel engine technology development. In this paper, first based on the technical features of low temperature combustion, the study status and focus are illustrated in five aspects, including characteristics of low temperature combustion, combustion process optimization, exhaust emission characteristics, the effects of fuel properties on low temperature combustion and closed-loop control of low temperature combustion. On this basis, the paper gives a view of the outlook for the development of low temperature combustion, which is necessary to better satisfy the requirements of energy-saving and environmental protection for diesel engines.

Keywords: diesel engine; low temperature combustion; nitrogen oxides emissions; soot emissions

节能和环保一直是影响内燃机技术发展方向
的两大要素。柴油机具有比汽油机更高的压缩比,
热效率较高, 与同排量的汽油机相比, 燃油消耗可
以降低 30%, 二氧化碳 (CO₂) 的排放量亦可减少

25%。为此, 国内外学者在内燃机领域都非常重视
先进柴油机技术的研究。

受限于柴油机的传统燃烧方式 (即扩散燃烧)
所固有的局限性, 柴油机的主要排放物氮氧化物

收稿日期: 2016-03-16 改稿日期: 2016-05-17

基金项目: “高等学校创新引智计划资助” 111 项目 (B08019); 上海市重点学科建设项目 (B303)

参考文献引用格式:

张志强, 赵福全, 李理光. 柴油机低温燃烧技术综述 [J]. 汽车工程学报, 2016, 6(4): 235-243.

ZHANG Zhiqiang, ZHAO Fuquan, LI Liguang. A Review on Technologies of Low Temperature Combustion for Diesel Engines [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2016, 6(4): 235-243. (in Chinese)

(NO_x) 和碳烟等较难同时改善。这主要是由于 NO_x 生成的主要条件是高温富氧, 如图 1 所示, NO_x 易在接近火焰前锋面的区域内生成, 而碳烟生成的先决条件是富油缺氧。 NO_x 和碳烟的生成条件互异, 两者之间存在着权衡的关系, 即降低 NO_x 排放的同时碳烟排放容易增加, 反之亦然。

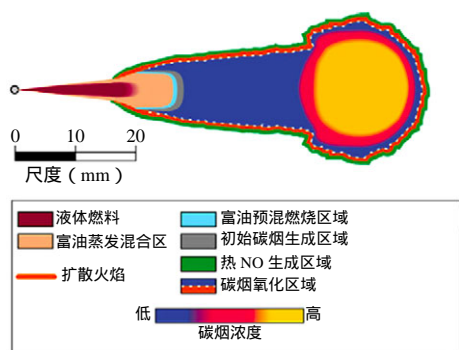


图 1 传统柴油机燃料喷射和 NO_x 及碳烟生成区域^[1]

为了改善柴油机的排放问题, 在国内外涌现出两种技术路线, 一种是先通过优化柴油机燃烧过程, 降低碳烟排放, 再基于选择性催化还原技术 (Selective Catalytic Reduction, SCR) 来降低 NO_x 排放。另一种是先通过废气再循环 (Exhaust Gas Recirculation, EGR) 降低 NO_x 排放, 再利用颗粒捕集系统 (Diesel Particulate Filter, DPF) 来降低碳烟排放, 从而达到同时降低 NO_x 和碳烟排放的目的。然而这两种技术路线都会带来额外成本和配套建设等问题。因此, 需要一种更加节能、减排和不需要(或尽量简化)后处理的柴油机新型燃烧技术, 以满足更加环保的柴油机技术发展需求。

大量的专家和学者结合柴油机燃烧过程进行研究, 在传统柴油机燃烧过程中, 缸内局部当量比 (ϕ) 和温度 (T) 的变化和发展过程必然会穿过满足 NO_x 和碳烟生成条件的区域, 从而导致在燃烧过程中会无法避免地产生 NO_x 和碳烟排放, 如图 2 所示。同时基于柴油机燃烧过程分析可知, 当缸内温度低于 1650 K 时, 无论缸内的 ϕ 和 T 如何变化和发展, 燃烧过程都可以避开满足 NO_x 和碳烟排放生成条件的区域, 即可同时实现超低 NO_x 和碳烟排放。因此一些新型的燃烧方式被提出, 如 Ryan 和 Callahan^[3] 提出柴油机均质压燃 (Homogeneous

Charge Compression Ignition, HCCI) 可有效降低 NO_x 和碳烟排放。在柴油机实际工作过程中, 绝对均质的混合气是难以制备的。后续的相关研究中, 大量学者和研究人员提出了通过缸内燃油早喷方式制备准均质预混合气, 即预混充量压燃 (Premixed Charge Compression Ignition, PCCI), 该燃烧方式在柴油机缸内局部 ϕ - T 图如图 2 所示。

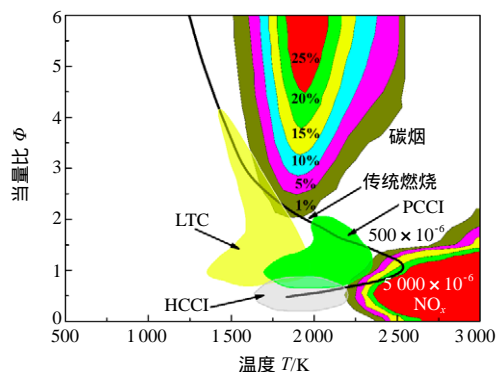


图 2 传统和新型燃烧方式对比^[2]

柴油机低温燃烧方式 (Low Temperature Combustion, LTC) 是在 HCCI 和 PCCI 等燃烧方式的基础上进一步发展而来的。LTC 方式主要是通过 EGR 或可变压缩比及可变进排气门正时等方法来降低缸内平均温度和延长滞燃期, 同时配合较高的喷油压力, 以改善燃油和空气之间的雾化和混合过程, 并且使燃油处于当量比小于 2 的范围, 达到同时减少 NO_x 和碳烟排放的目的。LTC 方式具有较为广泛的适用范围, 学术界和工业界对其开展了大量的研究。

为此, 本文围绕柴油机 LTC 研究技术特点, 对其进行分类 (主要体现在 LTC 的燃烧特性研究、LTC 的燃烧优化研究、有害产物生成特征研究、燃料特性对 LTC 影响研究和 LTC 闭环控制研究等五个方面), 并阐述了相关的最新研究成果。

1 LTC 的燃烧特性研究

Aceves 和 Flowers^[4] 将简化混合机理和详细化学动力学机理相耦合, 研究 LTC 方式下燃油喷射、雾化和燃烧及排放生成过程, 结果发现, 碳烟前驱体随着 EGR 的增加形成一个二次曲线的变化特点, 并且碳烟前驱体的生成量与缸内气体温度和特征混合时间成正相关。

Zheng 等^[5] 结合柴油和两种生物柴油进行 LTC 台架试验, 研究表明, 当 EGR 率处于较小范围时, 燃烧过程与传统燃烧模式相似, 为扩散燃烧, 同时其燃烧温度较高, 定义其为高温燃烧方式 (High Temperature Combustion, HTC)。当 EGR 率大到一定的程度, 受 EGR 率的影响, 滞燃期大幅增加, 同时燃烧温度较低, 定义为 LTC 方式。NO_x 排放随 EGR 的变化规律如图 3 所示, NO_x 排放随着 EGR 率的增大而降低。碳烟排放放在 HTC 阶段随着 EGR 的增大而升高, 在 LTC 阶段随着 EGR 率的增加而降低, 如图 4 所示。该试验结果佐证了 Aceves 和 Flowers 的机理研究结论。

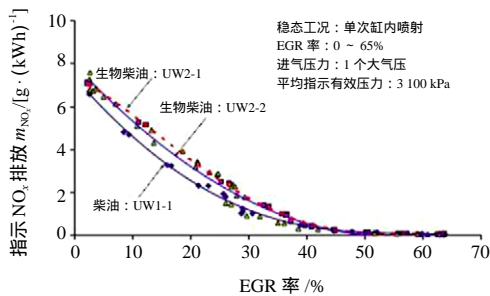


图 3 NO_x 排放随 EGR 变化规律^[5]

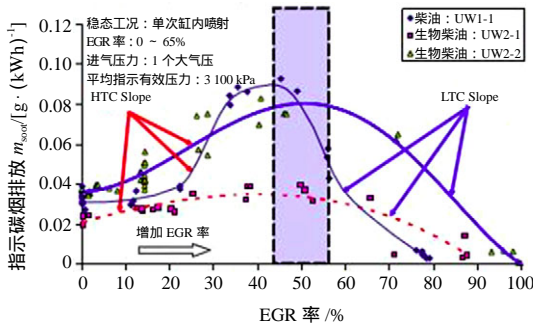


图 4 碳烟排放随 EGR 变化规律^[2]

Ariksson 和 Denbratt^[6] 对一台单缸柴油机进行不同 EGR 下的低温燃烧试验研究, 其研究表明在压缩比为 14, EGR 率增加到 60% 时, LTC 模式可以拓展至 50% 的柴油机负荷范围。NO_x 和碳烟排放维持在极低水平的同时, CO、HC 和燃油消耗率却显著增加, 即 LTC 方式下存在一种新的权衡关系:(NO_x & 碳烟) vs. (CO & HC)。

2 LTC 的燃烧优化研究

对 LTC 燃烧过程进行优化的主要目的是为了促

进燃油与空气的混合, 并改善排放性能。目前常用的优化方法有: 喷油系统的改进和喷油策略的优化, 进气系统的优化和可变压缩比技术等。

2.1 喷油系统的改进和喷油策略优化

2.1.1 喷油系统的改进

传统的喷雾试验和理论分析研究表明, 提高燃油的喷射压力可以提高喷雾能量, 促进燃油的破碎、蒸发和混合。但是在 LTC 方式中, 为了促进燃油和空气的雾化和混合效果, 一般采用较大的喷油提前角。而此时缸内压力较小, 雾束贯穿距比传统喷油提前角状态下要大, 因此部分燃油会喷射到燃烧室壁面甚至是缸壁, 从而导致“湿壁”等现象。

为了避免 LTC 方式中“湿壁”等现象的发生, 可以采用较小喷孔锥角和超多喷孔及超细喷孔直径的喷油器。如 Li 等^[7] 通过耦合详细反应机理的二维计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模型进行了模拟研究, 其模拟研究结果如图 5 和图 6 所示, 在喷孔锥角为 100° 时, 缸内燃油的雾化效果较好, 同时可以保证较少的燃油喷射到活塞顶面和挤流区, 并且 HC 和 CO 排放相对较低。

缪雪龙等^[8] 采用 16 孔喷嘴, 喷孔直径仅为 0.16 mm 的超多和超细喷孔的喷油器, 结合 54% 的 EGR 率, 实现了柴油机 LTC 方式, 并且烟度排放

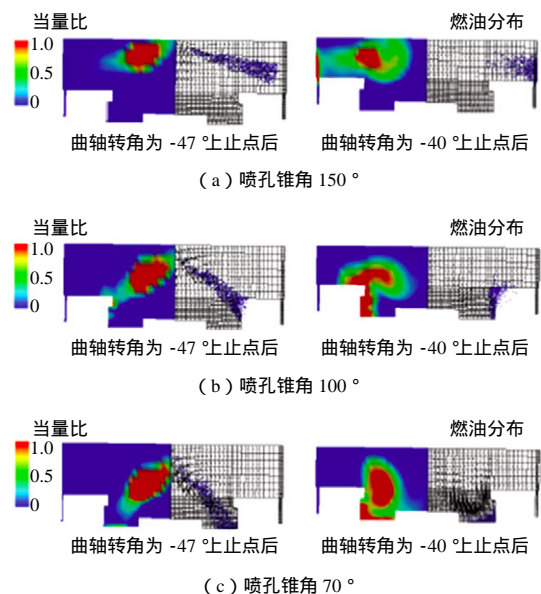


图 5 不同喷孔锥角下当量比和燃油分布^[7] (左侧为当量比; 右侧为燃油分布)

比原机下降了 63%， NO_x 比原机降低了 81%，大幅改善了原机排放性能。

提高喷油压力，即可提高油束的动能，增强油束对空气的扰动效果，改善低温燃烧方式下的燃烧效果。如李鑫善等^[9]通过 KIVA 进行数值模拟仿真，其仿真结果表明，喷油压力从 120 MPa 提高到 160 MPa，低温燃烧下的滞燃期缩短，CO 和碳烟排放降低，同时燃油消耗率降低。为此，采用较高喷油压力是实现和改善 LTC 的有效方式。

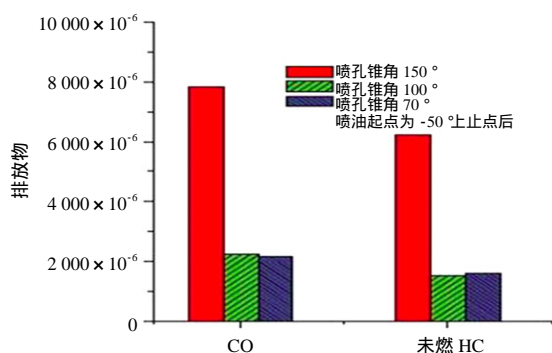


图6 不同喷孔锥角下 CO 和 HC 排放^[7]

2.1.2 喷油策略优化

为了促进燃油与空气的混合及减少“湿壁”现象的发生，多次喷油策略也是非常有效的方法。如 Hotta 等^[10]基于一台光学发动机进行多次喷射方式下的低温燃烧试验研究，结果表明，采用一次较短预喷射能够很好地避免燃油在缸内壁面上的富集，在主喷之后辅以一定的后喷能够将生成的碳烟卷入到挤流区中，并进一步将其氧化，最终使碳烟排放得到改善。

天津大学的苏万华教授等^[11]提出一种基于多脉冲喷油模式的可控预混合燃烧和稀扩散燃烧结合的复合燃烧系统 (Mulinbump)。采用该复合燃烧系统，柴油机的 NO_x 和碳烟排放非常低，同时该复合燃烧系统适用的工况最高可至指示平均有效压力 (Indicated Mean Effective Pressure, IMEP) 为 0.93 MPa 的工况。

2.2 进气系统的优化

进气系统的优化主要是指进气成分控制及冷却、进气压力的提高和进气涡流比的优化。

鉴于 LTC 的实现方式主要是通过大比例的 EGR 率，因此对进气系统的废气成分和温度进行精细控制是实现 LTC 的重要手段。Ehleskog 等^[12]通过精密控制 EGR 阀，对 EGR 率进行准确控制，并通过发动机冷却水对 EGR 废气进行冷却，保证进气温度稳定在 25℃。Ehleskog 等的试验结果表明，在 EGR 率从 0% 增加至 30% 时，缸内碳烟生成和氧化过程均被削弱，但最终仍导致较多碳烟排放生成； NO_x 排放随着 EGR 的增加而一直较少；CO 和 HC 排放在过高 EGR 率时显著增加，若此时提高喷油压力则可明显减少 CO 和 HC 排放。

提高进气压力可以提高缸内气体的密度，减少喷雾贯穿距，同时降低 HC 和 CO 排放。Aoyagi 等^[13]通过采用超高进气增压 (进气压力最高达到了 351.3 kPa) 和 30% 的 EGR 率实现了 LTC，并达到了降低 NO_x 排放而碳烟排放不恶化，同时柴油机的动力性不变，热效率不降低的试验目的。

韩志强^[14]等通过采用双级增压系统，在 25% ~ 100% 负荷下实现进气增压比达 1.5 ~ 4 倍，并且在各种负荷工况下均能够实现 LTC 模式。同时耦合“主喷 + 后喷”的喷油模式，利用后喷油量来增加燃烧后期温度，加速燃烧后期对碳烟的氧化过程。后喷增加部分废气能量，进而提高增压器转速，增加进气压力，从而增加进气流量，降低缸内平均当量比，进一步减少碳烟排放。

进气涡流是指绕气缸轴线有组织的进气气流运动。对进气涡流进行一定的优化能够有效促进燃油和缸内空气的扩散、混合及燃烧。Choi 等^[15]基于一台光学发动机，开展涡流比对 LTC 过程影响的研究，其结果表明涡流比的变化对燃烧过程的后期影响较大，而对燃烧初期的影响较小。另外在不同的负荷工况条件下，涡流比对碳烟排放的影响也不相同。如图 7 所示，在小负荷工况条件下 (300 kPa)，随着涡流比的增大，碳烟发光度减弱，碳烟氧化速度加快，碳烟排放减少；在较大负荷工况条件下 (600 kPa)，则存在一个最佳的涡流比，其能够保证碳烟氧化速度最快，同时碳烟排放最少。

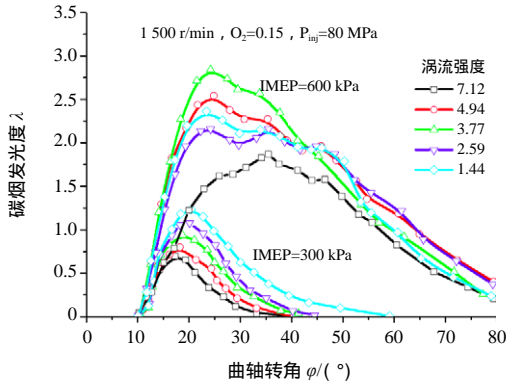


图 7 不同负荷碳烟发光度随涡流比的变化规律 [15]

2.3 可变压缩比技术

改变柴油机的压缩比可以改变缸内气体的密度和温度等，从而可以改变燃油的滞燃期。对于 LTC 而言，适度降低压缩比，可以延长燃油的滞燃期，促进燃油和空气的雾化混合，并且降低压缩终了时的缸内温度，有利于减少 NO_x 排放，也可以降低缸内最大爆发压力和拓宽低温燃烧运行工况范围。改变压缩比的方法主要有两种：一是改变活塞行程，即改变真实的压缩比；另一种是借助可变气门驱动机构 (Variable Valve Actuation, VVA) 实现有效压缩比的可变。利用 VVA 更容易实现有效压缩比的可变。

Murata 等 [16] 通过如图 8 所示的 VVA 机构，实现了进气门晚关 (Late Intake Valve Closing, LIVC)，对应的进气门和排气门的开启和关闭时刻如图 9 所示。Murata 等还开展了不同喷油时刻 (早喷、标准喷射和晚喷) 及早喷耦合 LIVC 的试验研究，结果如图 10 所示。在采用早喷耦合 LIVC 时，压缩终了时的缸内空气温度下降，避免早燃的发生，并延长了滞燃期，改善了燃油与空气的混合过程，实现了较低的 NO_x 和碳烟排放。

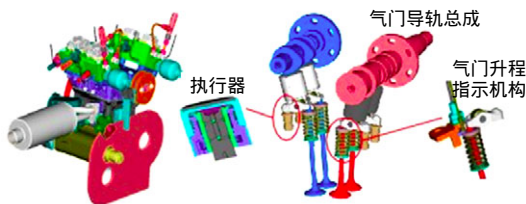


图 8 VVA 机构图 [16]

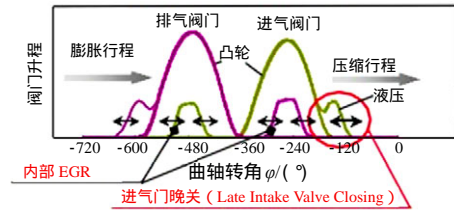


图 9 LIVC 下进排气门开闭时刻 [16]

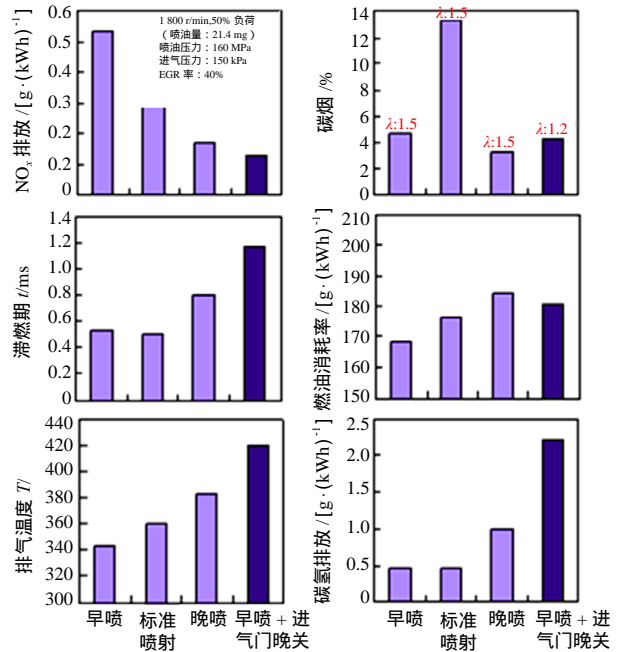


图 10 不同喷油时刻 (早喷、标准喷射和晚喷) 及早喷耦合 LIVC 的试验结果 [16]

3 有害产物生成特征研究

尧命发等 [17] 对不同进气氧浓度下低温燃烧生成的 NO_x、HC 中的组分和碳烟排放及粒径特征进行试验研究，结果表明：随着进气氧浓度的降低，NO 占总 NO_x 排放的比例会出现先降低后升高的趋势，NO₂ 占总 NO_x 排放的比例呈相反趋势，N₂O 占总 NO_x 排放的比例则一直保持非常低的水平，如图 11 所示。HC 排放随着进气氧浓度的变化关系如图 12 所示，其中小分子 HC (如甲烷和甲醛等) 占总 HC 的质量比随着进气氧浓度的降低会呈现先升高后降低的趋势，而大分子 HC 所占总 HC 的质量比则呈相反趋势。

碳烟排放随进气氧浓度的变化关系如图 13 所示，随着进气氧浓度的降低，碳烟呈先增大后减小

的变化趋势。碳烟排放的粒径和浓度随进气氧浓度的变化关系如图 14 所示，当进气氧浓度降低至一定程度时（进气氧浓度为 11% 到 13%），碳烟排放的粒径变化不大；而在超低进气氧浓度条件下（进气氧浓度小于 10%），碳烟排放较少，同时其粒径和粒子浓度都较小。

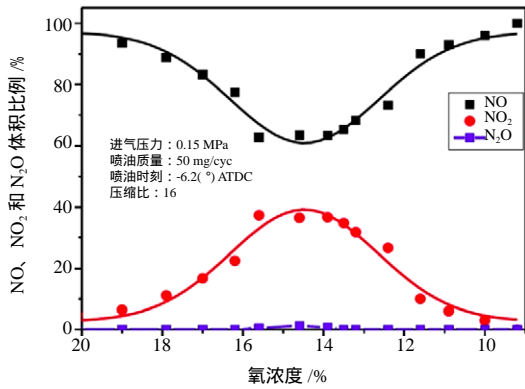


图 11 NO、NO₂ 和 N₂O 随着进气氧浓度的变化关系^[17]

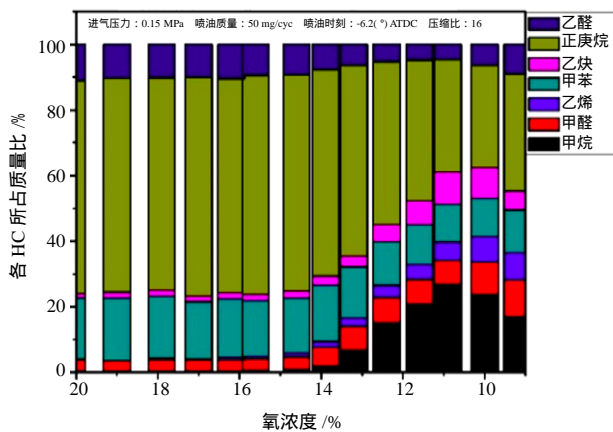


图 12 HC 中主要成分的质量比随进气氧浓度变化关系^[17]

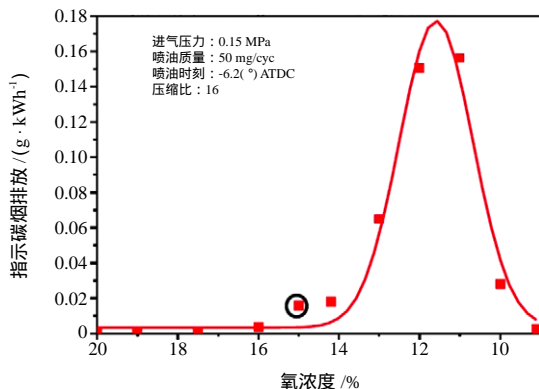
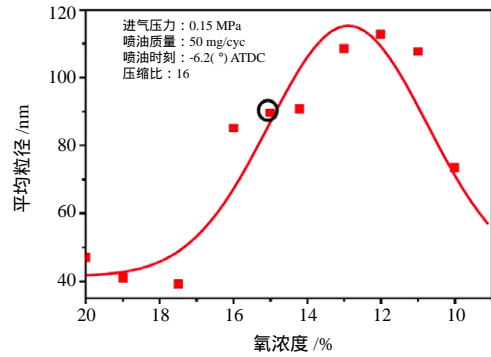
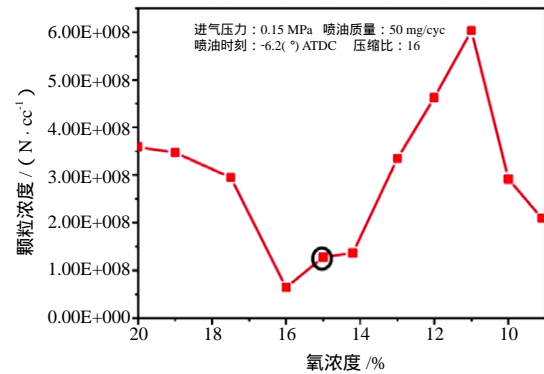


图 13 碳烟排放随氧浓度的变化关系^[17]



(a) 碳烟的粒径



(b) 碳烟的粒子浓度

图 14 碳烟粒径和粒子浓度随氧浓度变化关系^[17]

Musculus^[18] 通过激光成像诊断技术，发现 LTC 排放物的生成区域与传统柴油机下的生成区域不相同，即 LTC 中 NO_x 生成区域不限于火焰前锋面，而在雾束所贯穿的高温、富氧和有 OH 基存在的区域内均可见 NO_x 的分布。同时碳烟的生成区域主要集中在雾束的下游，其具体分布如图 15 所示。

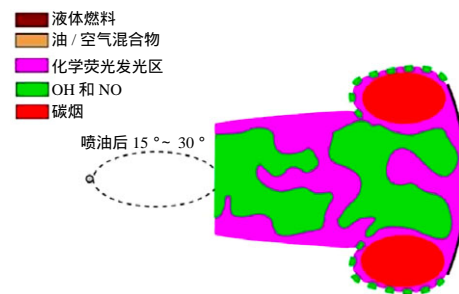


图 15 低负荷和早喷状态下低温燃烧内雾束周围排放物生成区域^[18]

4 燃料特性对 LTC 的影响研究

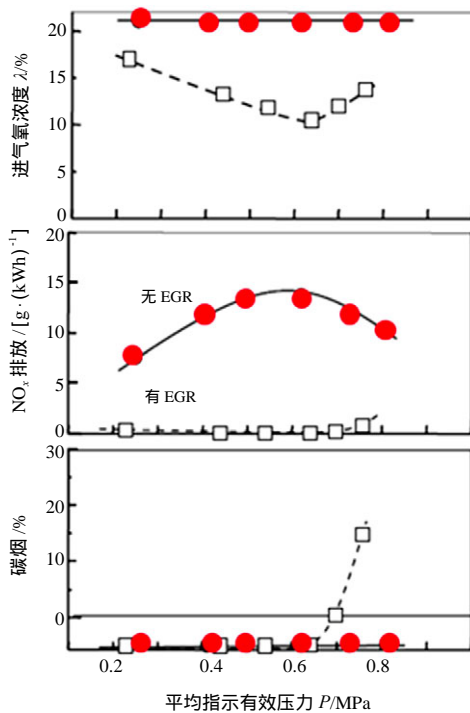
鉴于传统柴油在 LTC 模式下所表现出的不足，大量学者从燃料配制或掺混等方面开展了不同燃料

特性下的 LTC 研究，这方面的研究主要集中在以下三个方面：改变柴油的十六烷值、掺混含氧燃料或掺混易挥发燃料。

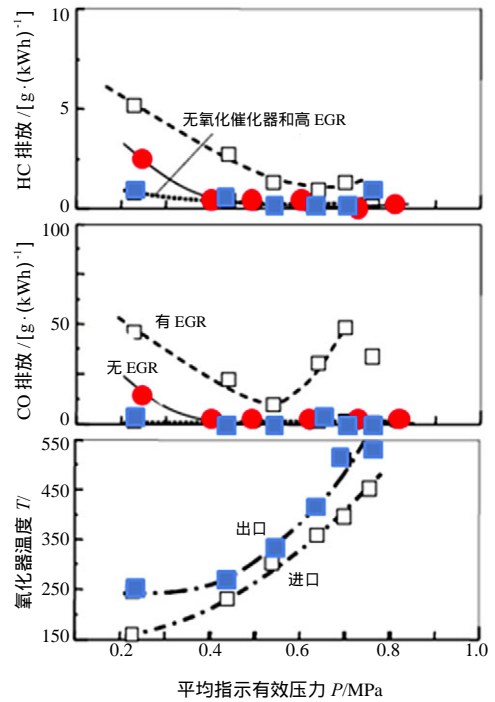
李铁等^[19]用正链烷烃和异链烷烃配制出六种具有不同十六烷值的燃料，其燃料特性见表 1。李铁等对这些燃料开展低温燃烧试验研究，结果如图 16 所示，采用较低十六烷值（十六烷值为 42）的燃料进行 LTC 时综合效果最佳。对 EGR 率、喷油正时和压缩比进行优化，并辅以尾气催化氧化剂（Diesel Oxidation Catalyst, DOC），可实现较低 NO_x、碳烟、HC 和 CO 排放，同时热效率大于 40%，并使低温燃烧方式适用的工况拓展到 IMEP 为 0.63 MPa 的工况。

表 1 六种不同十六烷值的燃料及其特性^[19]

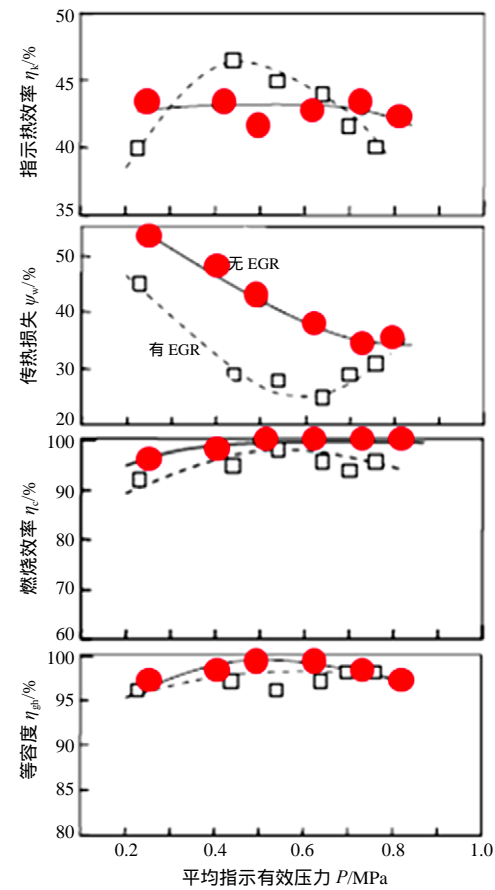
燃料特性	NP	IP	RF6-4	RF5-5	RF3-7	RF2-8
密度(15 °C)/(kg·m ⁻³)	760	789	772	775	781	784
动力粘度(30 °C)/(mm ² ·s ⁻¹)	2.05	3.20	2.51	2.62	2.85	2.97
十六烷值	94	19	64	57	42	34
50% 馏分温度 / °C	231	236	233	233	234	235
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	43.9	43.8	43.9	43.9	43.8	43.8



(a) 进气氧浓度、NO_x和碳烟排放对比



(b) UHC、CO 排放和催化器后温度对比



(c) 等容度、燃烧效率、传热损失和指示热效率对比

图 16 采用较低十六烷值（42）条件下的低温燃烧与传统燃烧对比^[19]

尧命发等、Zheng 等、Francisco 等和 Upatnieks 等分别将丁醇、生物柴油和二乙二醇二乙醚 ($C_8H_{18}O_3$) 等含氧燃料与柴油掺混后进行 LTC 试验。试验结果均表明通过提高燃料的氧浓度可以有效降低 NO_x 和碳烟排放, 并且低温燃烧工况得到了更大拓展, 动力性和燃油经济性得到了改善。

5 LTC 闭环控制研究

由于柴油机 LTC 方式的实现大多需要采用较大 EGR 率, 而废气的具体成分和流动状态较易出现波动, 同时大量的 EGR 废气与新鲜进气充量之间的互相混合过程也具有一定的不均匀性, 进而会对柴油机 LTC 过程造成燃烧循环变动。为此若能准确地获悉每个工作循环的燃烧状态, 结合相应的策略进行闭环反馈控制, 则有望保证每个工作循环的燃烧及排放过程均处于较佳状态, 有利于提高柴油机的动力性、燃油经济性和改善排放特性。

在柴油机 LTC 及闭环控制研究领域, 清华大学的杨福源副教授等、上海交通大学的邓康耀教授等和加拿大温莎大学的郑明教授等都分别提出以缸压信号为基础, 对燃烧放热过程进行闭环控制, 以保证柴油机始终工作在较高指示热效率和较好排放性能的范围。

笔者通过搭建如图 17 所示的离子电流测试系统, 开展了 LTC 下离子电流特性研究, 提出了基于

离子电流的燃烧放热过程特征参数估计方法, 并建立了基于离子电流的柴油机 LTC 闭环反馈控制策略, 改善了 LTC 时的燃烧稳定性和瞬态 HC 排放。

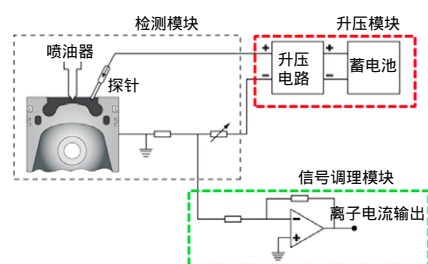


图 17 柴油机离子电流检测系统示意图^[20]

6 结论

本文分析了传统柴油机燃烧方式的不足, 并依次介绍了各种新型燃烧方式的特点, 它们的核心思路都是通过改善燃油与空气之间的雾化及混合过程, 并尽可能地获得较为均匀的混合气, 降低缸内平均温度, 避免过浓混合气的出现, 从而达到降低排放的目的。

LTC 方式作为近年来的研究热点, 目前针对这种燃烧方式所开展的技术研究主要集中在其燃烧特性研究、燃烧优化研究、有害产物生成特征研究、燃料特性对 LTC 的影响研究和 LTC 闭环控制研究等方面。总之, 通过不断开展和完善 LTC 相关研究技术, 最大限度地发挥 LTC 的优势, 必能保证柴油机更加符合节能和环保的要求。

参考文献 (References) :

- [1] ARONSSON U, CHARTIER C, ANDERSSON Ö, et al. Analysis of EGR Effects on the Soot Distribution in a Heavy Duty Diesel Engine Using Time-Resolved Laser Induced Incandescence [J]. SAE International Journal of Engines, 2010, 3(2): 137-155.
- [2] OPAT R, RA Y, MANUEL A G D, et al. Investigation of Mixing and Temperature Effects on HC/CO Emissions for Highly Dilute Low Temperature Combustion in a Light Duty Diesel Engine [C]//SAE Technical Paper, 2007-01-0193.
- [3] RYAN T W, CALLAHAN T J. Homogeneous Charge Compression Ignition of Diesel Fuel [C]//SAE Technical Paper, 961160.
- [4] ACEVES S M, FLOWERS D L. A Detailed Chemical Kinetic Analysis of Low Temperature Non-Sooting Diesel Combustion [C]//SAE Technical Paper, 2005-01-0923.
- [5] ZHENG Ming, MULENGA M C, READER G T, et al. Biodiesel Engine Performance and Emissions in Low Temperature Combustion [J]. Fuel, 2008, 87(6): 714-722.
- [6] ALRIKSSON M, DENBRATT I. Low Temperature Combustion in a Heavy Duty Diesel Engine Using High Levels of EGR [C]//SAE Technical Paper, 2006-01-0075.
- [7] LI Cao, SU Haiyun, MOSBACH S, et al. Studying the Influence of Direct Injection on PCCI Combustion and Emissions at Engine Idle Condition Using Two

- Dimensional CFD and Stochastic Reactor Model [C]// SAE Technical Paper, 2008-01-0021.
- [8] 缪雪龙, 郑金保, 洪建海, 等. 超多喷孔喷嘴早喷射低温燃烧试验研究 [J]. 现代车用动力, 2012 (4) : 1-6. MIAO Xuelong, ZHENG Jinbao, HONG Jianhai, et al. Experiment Study on Early Injection Low Temperature Combustion of Ultra-Multi-Hole Nozzle [J]. Modern Vehicle Power, 2012(4) : 1-6. (in Chinese)
- [9] 李鑫善. 燃烧系统参数对柴油机低温燃烧性能影响的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013. LI Xinshan. Investigation of Effects of Combustion System Parameters on the Performance of Diesel Low Temperature Combustion [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [10] HOTTA Y, INAYOSHI M, NAKA KITA K. Achieving Lower Exhaust Emissions and Better Performance in an HSDI Diesel Engine with Multiple Injection [C]//SAE Technical Paper, 2005-01-0928.
- [11] SU Wanhua, WANG Hui, LIU Bin. Injection Mode Modulation for HCCI Diesel Combustion [C]//SAE Technical Paper, 2005-01-0117.
- [12] EHLESKOG M, GJIRJA S, DENBRATT I. Effects of High Injection Pressure, EGR and Charge Air Pressure on Combustion and Emissions in an HD Single Cylinder Diesel Engine [J]. SAE International Journal of Engines, 2009, 2(2) : 341-354.
- [13] AOYAGI Y, OSADA H, MISAWA M, et al. Advanced Diesel Combustion Using of Wide Range, High Boosted and Cooled EGR System by Single Cylinder Engine [C]// SAE Technical Paper, 2006-01-0077.
- [14] 韩志强. 两级增压系统参数选择以及对燃烧过程的影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012. HAN Zhiqiang. Parameters Selection of Two Stage Turbocharging System and Its Effect on Combustion Process [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [15] CHOI D, MILES P C, YUN H, et al. A Parametric Study of Low-Temperature, Late-Injection Combustion in a HSDI Diesel Engine [J]. JSME International Journal, 2005, 48 (4) : 656-664.
- [16] MURATA Y, JIN K, ODAKA M, et al. Achievement of Medium Engine Speed and Load Premixed Diesel Combustion with Variable Valve Timing [C]//SAE Technical Paper, 2006-01-0203.
- [17] 张全长, 尧命发, 郑尊清, 等. 废气再循环对柴油机排气组分影响的试验研究 [C]// 中国内燃机学会燃烧节能净化分会 2010 年学术年会暨 973 项目年度汇报会论文集, 重庆, 2010. ZHANG Quanchang, YAO Mingfa, ZHENG Zunqing, et al. Experiment Study on the Effects of EGR on the Exhaust Emission Components for Diesel Engine [C]// The 2010 Academic Convention of Combustion Energy-Saving Purification Section, Chinese Society of Internal Combustion Engine, Chongqing, 2010. (in Chinese)
- [18] MUSCULUS M P B. Multiple Simultaneous Optical Diagnostic Imaging of Early-Injection Low-Temperature Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine [C]//SAE Technical Paper, 2006-01-0079.
- [19] LI Tie, SUZUKI M, OGAWA H. Characteristics of Smokeless Low Temperature Diesel Combustion in Various Fuel-Air Mixing and Expansion of Operating Load Range [C]// SAE Technical Paper, 2009-01-1449.
- [20] ZHANG Zhiqiang, ZHAO Fuquan, LI Liguang, et al. Closed-Loop Control of Low Temperature Combustion Employing Ion Current Detecting Technology [C]// SAE Technical Paper, 2014-01-1362.

作者介绍



张志强 (1985-), 男, 江西贵溪人。博士, 主要研究方向为新能源汽车开发、内燃机燃烧与排放控制。

E-mail: zhangzq@dfzm.com