

基于HCCI的内燃机高效清洁燃烧技术研究进展

吴涛阳, 李国田, 郝婧, 吴春玲, 银增辉

中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津

收稿日期: 2022年5月1日; 录用日期: 2022年5月15日; 发布日期: 2022年5月25日

摘要

在均质充量压燃着火燃烧(HCCI)燃烧模式下, 发动机缸内具有均质、低温燃烧的特点, 可以实现高效率, 同时获得极低的NO_x和PM排放。HCCI燃烧技术一直是世界范围内燃机领域技术研究热点。本文综述了内燃机各类HCCI燃烧技术, 重点分析了缸外预混/缸内早喷/缸内晚喷等柴油机HCCI, 以及汽油机可控自燃(CAI)等HCCI燃烧技术的实现方式、技术特点、优劣势以及发展趋势, 以期为内燃机行业燃烧技术研究和产品开发工作提供参考和借鉴。

关键词

内燃机, 均质充量压燃, 柴油, 汽油, 实现方式

Research Progress of Efficient and Clean Combustion Technology for Internal Combustion Engines Based on HCCI

Taoyang Wu, Guotian Li, Jing Hao, Chunling Wu, Zenghui Yin

CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin

Received: May 1st, 2022; accepted: May 15th, 2022; published: May 25th, 2022

Abstract

In the homogeneous charge compression ignition combustion (HCCI) combustion mode, the engine has the characteristics of homogeneous and low-temperature combustion in the cylinder, which can achieve high efficiency and obtain extremely low NO_x and PM emissions at the same time. HCCI

combustion technology has been a research hotspot in the field of internal combustion engines worldwide in recent years. This paper reviews various HCCI combustion technologies of internal combustion engines. This paper focuses on the analysis of the implementation methods, technical characteristics, advantages and disadvantages, and development trends of diesel engine HCCI such as out-of-cylinder premixing/in-cylinder early injection/in-cylinder late injection, as well as HCCI combustion technologies in gasoline engines, such as controllable spontaneous combustion (CAI). The purpose of this paper is to provide reference and reference for the research and product development of combustion technology in the internal combustion engine industry.

Keywords

Internal Combustion Engine, Homogeneous Charge Compression Ignition, Diesel, Gasoline, Implementation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

传统柴油机属于燃料喷雾扩散燃烧, 液态燃油被喷入燃烧室空间后, 形成一个由液柱、油滴、油蒸汽和空气组成的多相混合场, 称之为喷雾场[1]。对于柴油机而言, 喷雾场在动力学和热力学上都是瞬变而又极不均匀的。当发动机活塞压缩燃料和空气混合气到接近上至点时, 混合气因为被压缩而产生高温并自燃着火。柴油机缸内由于喷射油雾与空气的混合时间较短, 燃料与空气的混合严重不均匀, 形成了高温火焰区和高温过浓区, 分别产生 NO_x 和 PM 排放。

传统汽油机属预混合准均质燃烧, 借助火花塞点燃, 湍流控制着燃烧过程, 湍流强度和混合气成分控制着火和火焰传播[2]。由于汽油特性和爆燃等诸多因素的限制, 汽油机只能采用较低的压缩比(一般为 8~12), 而且汽油机采用量调节(即需要用节气门控制进气量), 因此, 部分负荷时的泵气损失使汽油机的整机效率比柴油机的要低得多, 燃料利用率也比柴油机低 40% 左右, 这就是传统汽油机难以克服的燃料利用率极限。

均质充量压缩点燃式(HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition)发动机综合了传统汽油机均质燃烧和柴油机压缩自燃的特点, 采用稀薄均质混合气多点同时着火及分布式燃烧方式, 避免了火焰的传播及局部的高温区, 因而不仅能得到较高热效率, 同时还可以大幅度地降低 NO_x 和微粒的排放[3] [4] [5]。在 HCCI 燃烧模式下, 发动机具有极大的潜力保持高热效率, 同时获得极低的污染物排放。这是目前在世界范围内的内燃机领域广大研究者从事 HCCI 燃烧过程研究的原动力。

2. 基于柴油燃料的 HCCI 燃烧技术

以柴油为燃料的 HCCI 燃烧技术可以根据混合气形成方式分成三类: 1) 缸外预混 HCCI, 即在进气冲程柴油被喷入进气管, 与空气混合形成预混合气。2) 缸内早喷 HCCI, 即在压缩冲程早期, 柴油被喷入气缸, 随活塞上行逐步与空气混合, 直至发生自燃着火。3) 缸内晚喷 HCCI, 即在压缩上止点后开始喷油, 并结合提高喷射压力和进气涡流, 以及高 EGR 率, 提高柴油与空气的混合速率, 延长滞燃期, 以保证在滞燃期内完成喷射形成混合气。

2.1. 缸外预混柴油 HCCI

缸外预混 HCCI 燃烧技术与传统进气口喷射汽油机相类似, 燃料在进气道喷入并在那就开始与空气进行混合, 燃料雾化和混合的时间很充裕, 它是最直接、且最容易实现的均匀预混合气形成方法。Gray 等人[6]分别在不同的发动机上进行了缸外预混合柴油 HCCI 的研究工作。美国西南研究院最早采用了这种混合气形成方式对柴油机 HCCI 进行研究, 其试验装置示意图如图 1 所示。该技术方案利用低压喷射方式将柴油从进气道喷入, 同时采用进气加热来促进柴油和空气的混合以保证均匀混合气的形成, 以实现稀薄、均匀混合气的低温燃烧。因此 NO_x 排放可以减少 98% 以上[7] [8]。此外, 因为消除了缸内的混合气局部过浓区, 可使 PM 排放比原机降低 27%, 且某些工况的最高指示热效率比原机有所改善。但由于燃烧着火时刻较早, 受到爆震燃烧的限制, 其运转工况范围比较狭窄, 另外, 其 HC 和 CO 排放较高。而且采用该种方式时, 燃料可能会粘附在进气道壁上, 而且需要借助进气加热来促进燃料与空气的混合, 控制较复杂, 此外, 对混合气的形成和着火燃烧过程无法直接进行控制, 因此该方案的实用性很差。

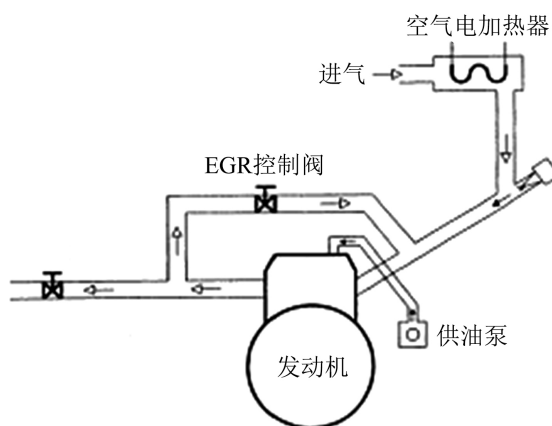


Figure 1. Schematic diagram of HCCI technology based on port injection in diesel engine

图 1. 基于进气道喷射的柴油机 HCCI 技术示意图

2.2. 缸内早喷柴油 HCCI

在缸内早喷柴油 HCCI 技术方案中, 燃料在压缩冲程早期喷入汽缸并与空气进行混合, 与进气道喷射燃料相比, 早喷柴油 HCCI 压缩冲程气缸内的温度和压力, 高于进气门开启时进气管内的温度和压力, 有助于燃油的雾化和混合。压缩冲程早期喷油, 降低了对进气温度的要求, 从而也减少了混合气早燃的倾向; 同时, 通过喷油系统的适当设计, 可以减小燃油碰壁和润滑油稀释的可能性[9]。但它存在的问题主要有: 燃料雾化与空气混合的时间不是很充裕、过早喷油会导致燃料粘附在汽缸壁上, 导致润滑油被稀释以及未燃 HC 排放增多以及依然不能对燃烧着火时刻进行直接控制等。New ACE 研究所的 PREDIC 和 MULDIC 燃烧系统以及日本丰田公司的 UNIBUS 燃烧系统是缸内早喷 HCCI 技术的典型代表[9] [10]。

柴油缸内早喷 HCCI 最初的技术方案是一个具有两套喷油系统、三个喷油器的多喷油器喷射系统(中央一个, 侧置两个)。这三个喷油器的喷油压力、喷油数量和喷射时刻可实现独立调节, 以取得促进燃料在缸内与空气的混合及分布的效果[10]。试验结果表明, 该方案在某种程度上改善了燃料和空气的混合, 并在某些优化工况可使 PM 和油耗在 NO_x 排放较低的条件有所改善, 但由于采用与柴油机相似的喷油时刻所留给混合气形成的时间非常短, 使得油气混合的效果还是不够理想, NO_x 排放仍相对较高。后来, 有研究者在压缩冲程较早的时刻利用两个侧置喷油器同时向气缸中央喷油的 PREDIC (PREmixed Lean

Diesel Combustion)燃烧系统,该系统工作时,两个侧置喷油器喷出的燃料射流在气缸中央碰撞,且由于混合时间较充分,可获得均匀度相对较高的混合气,极大地降低了 NO_x 排放。

2.3. 缸内晚喷柴油 HCCI

在缸内后喷柴油 HCCI 技术中,缸内压缩上止点后开始喷油,并结合提高燃油喷射压力和进气涡流,提高柴油与空气的混合速率,以及高 EGR 率,延长滞燃期,保证在滞燃期内形成混合气。缸内晚喷 HCCI 并不仅仅是将喷油时刻推迟,而是耦合高喷油压力、强进气涡流、高 EGR 率等技术,从而实现短喷油持续期和长滞燃期[11]。通过以上技术的综合应用,可以达到着火前在发动机缸内形成均质混合气。目前最成功的缸内晚喷柴油 HCCI 是日本 Nissan 公司开发的 MK (Modulated Kinetics)燃烧系统[12]。采用 MK 系统的发动机在 1998 年被投入批量生产,进入日本市场。MK 系统通过推迟喷油($7^\circ\text{BTDC}\sim 3^\circ\text{ATDC}$),大 EGR 率(使氧浓度降至 15%~16%),以延长着火滞燃期,使喷油能完全在着火滞燃期内完成,着火前形成比较均匀的预混合气。为了缩短喷油持续期, MK 系统采用了高压共轨喷油系统。为了延长着火滞燃期,将发动机的压缩比从 18:1 降到 16:1,并且采用冷却的 EGR。同时为了避免压缩比降低后液态油束撞壁的倾向加大,燃烧室直径被从 47 mm 增加到 56 mm。这一改进也大幅度降低了冷启动时的 HC 排放,但 PM 的排放(小于 1.0 BSU)仍要进一步降低。

3. 基于汽油燃料的 HCCI 燃烧技术

汽油机 HCCI (一般以可控自燃, Controlled Auto-Ignition, CAI 命名)与 SI 发动机对比具有:可消除节气门,减小泵吸损失;燃烧温度低,散热损失减少,可提高热效率;消除了局部高温区,可大幅度降低 NO_x 排放等优点。但是,实现实用的 CAI 发动机也要克服一系列的困难。首先要解决着火时刻控制、运转工况范围狭窄等问题。此外,由于汽油燃料的辛烷值和自燃着火温度都较高,因此实现 CAI 燃烧还要解决燃料和空气混合气能够达到它们的自燃着火条件这一个关键问题[13] [14]。

目前,能促使汽油燃料自燃着火以实现 CAI 燃烧的方法主要有以下几种:进气加热、提高发动机压缩比、采用着火性好的燃料以及废气再循环(EGR)等等。其中 EGR 可以提高进气充量的温度并使之自燃着火,同时 EGR 还可起到对混合气稀释的作用,这对 CAI 的着火时刻和燃烧过程控制非常重要,因此它具有很大的应用潜力。EGR 分外部 EGR 和内部 EGR。研究表明,使用外部 EGR, EGR 气体的温度大概为 $150^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$,即使当 EGR 率达到 70%时仍然不能实现真正意义上的无火花塞点火的 CAI 燃烧。但是,当采用内部 EGR 时,只使用了相当于发动机气缸的 36%体积的废气时就能实现 CAI 燃烧[15]。这表明,尽管冷却的外部 EGR 在延迟着火时刻以及降低燃烧反应速率方面具有巨大的潜力,但在提高充量温度,促使高辛烷值的汽油燃料产生自燃方面却不如内部 EGR。此外,外部 EGR 控制策略的响应还比内部 EGR 的慢。因此,比较而言采用内部 EGR 是最可行的实现 CAI 燃烧的技术途径。

对于采用内部 EGR 的 CAI,见报道最多的是基于可变气门控制技术的 CAI 燃烧。其中,根据内部 EGR 控制策略的不同可分为两种,一种是通过在排气冲程早关排气门,以实现一部分废气残留在气缸内部的废气残留法;另一种是在进气冲程同时打开进、排气门或先在排气冲程打开进气门将一部分废气回流入进气管,然后在进气行程中将废气和新鲜充量同时吸入气缸的废气重吸法。研究表明,这两种控制策略的本质是一样的,都可以将保持较高温度的已燃废气保留在气缸中,以此来实现稳定的 CAI 燃烧。但相比之下它们也各有特点:为了顾及在 SI 模式下的运转,废气重吸法要求的进排气门控制策略要求比废气残留法的复杂,但由于在相同条件下它能够吸入相对较多的新鲜充量,因此可以获得比采用废气残留法稍高的 IMEP,而废气残留法实现起来相对容易。有研究者在装有进排气门定时和升程连续可变机构(4-Variable Valve Actuating System, 4VVAS)的单缸试验发动机上,对基于内部废气重压缩策略的 CAI 燃

烧进行了研究,通过合理安排气门定时和升程,可以对CAI的燃烧进行控制,发动机可在转速为1000~4500 r/min 以及IMEP为0.1~0.45 MPa的相对较大的工况范围内实现稳定的CAI运转,燃油经济性得到改善,NO_x、HC和CO排放有所减少[16]。此外,发动机还可在SI和HCCI两种模式之间平顺转换,因此在高负荷工况,发动机可切换到SI模式运转以满足较高的功率输出要求。

4. 结束语

均质压燃着火(HCCI)燃烧技术给出了实现内燃机高效、低污染燃烧的新途径,近年来一直是国际内燃机界的研究热点。但是均质压燃着火燃烧过程尚有大量难点需要突破。特别对于柴油HCCI燃烧过程,由于柴油的粘度大,十六烷值高,混合气形成过程和自燃着火过程控制困难,高负荷问题更加突出。在高负荷实现均质压燃着火燃烧是国际上尚未解决的技术难点。HCCI技术的研究给内燃机工作者带来了诸多启示:1)绝对均质难以实现,并且不能走上实用化道路;2)传统内燃机燃烧要向消除局部过浓发展,从而控制颗粒物排放,并提高热效率;3)低温燃烧是控制NO_x排放的有效手段。

参考文献

- [1] Kimura, S., Aoki, O., Ogawa, H., Muranaka, S. and Enomoto, Y. (1999) New Combustion Concept for Ultra-Clean and High-Efficiency Small DI Diesel Engines. In: *International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition*, SAE International, Warrendale, SAE Paper 1999-01-3681. <https://doi.org/10.4271/1999-01-3681>
- [2] 郑尊清, 尧命发, 汪洋, 等. 二甲醚均质压燃燃烧过程的试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(6): 561-565.
- [3] 张波, 尧命发, 郑尊清, 等. 运行工况对基础燃料均质压燃燃烧过程影响的试验研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(4): 308-314.
- [4] 王宇宾, 邓康耀, 崔毅. 柴油均质压燃燃烧(HCCI)的计算模拟研究[J]. 柴油机, 2004(3): 18-21, 55.
- [5] 尧命发, 刘海峰. 均质压燃与低温燃烧的燃烧技术研究进展与展望[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(2): 79-90.
- [6] 尧命发. “均质压燃、低温燃烧”新一代内燃机燃烧技术[J]. 内燃机, 2012(2): 5-8.
- [7] Ryan III, T.W. and Callahan, T.J. (1996) Homogeneous Charge Compression Ignition of Diesel Fuel. *SAE Transactions*, **105**, 928-937.
- [8] Gray III, A.W. and Ryan III, T.W. (1997) Homogeneous Charge Compress Auto-ignition (HCCI) of Diesel/Fuel. In: *International Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition*, SAE International, Warrendale, SAE Paper 971676.
- [9] Kaneko, N., Ando, H., Ogawa, H. and Miyamoto, N. (2002) Expansion the Operating Range with In-Cylinder Water Injection in a Premixed Charge Compression Ignition Engine. In: *Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition*, SAE International, Warrendale, SAE Paper 2002-01-1743. <https://doi.org/10.4271/2002-01-1743>
- [10] Akagawa, H., Miyamoto, T., Harada, A., Sasaki, S., Shimazaki, N., Hashizume, T. and Tsujimura, K. (1999) Approaches to Solve Problems of the Premixed Lean Diesel Combustion. In: *International Congress & Exposition*, SAE International, Warrendale, SAE Paper 1999-01-0183. <https://doi.org/10.4271/1999-01-0183>
- [11] Lavy, J., Dabadie, J.-C., Anqelberqer, C., et al. (2000) Innovative Ultra-Low NO_x Controlled Auto-Ignition Combustion Process for Gasoline Engines: The 4-Space Project. In: *CEC/SAE Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition*, SAE International, Warrendale, SAE Paper 2000-01-1837. <https://doi.org/10.4271/2000-01-1837>
- [12] Oakley, A., Zhao, H., Ladommatos, N., et al. (2001) Experimental Studies on Controlled Auto-Ignition (Cai) Combustion of Gasoline in a 4-Stroke Engine. In: *SAE 2001 World Congress*, SAE International, Warrendale, SAE Paper 2001-01-1030. <https://doi.org/10.4271/2001-01-1030>
- [13] Zhao, H. and Peng, Z. (2001) Understanding the Effects of Recycled Burnt Gases on the Controlled Autoignition (Cai) Combustion in Four-Stroke Gasoline Engines. In: *SAE 2002 World Congress & Exhibition SAE International Fall Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition*, SAE International, Warrendale, SAE Paper 2001-01-3607. <https://doi.org/10.4271/2001-01-3607>
- [14] Zhao, H., Li, J., Ma, T., et al. (2002) Performance and Analysis of a 4-Stroke Multi-Cylinder Gasoline Engine with CAI combustion. In: *SAE 2002 World Congress & Exhibition*, SAE International, Warrendale, SAE Paper 2002-21-0420. <https://doi.org/10.4271/2002-01-0420>
- [15] Don, L. and Allen, J. (2002) On the Mechanism of Controlled Auto Ignition. In: *SAE 2002 World Congress & Exhibition*, SAE International, Warrendale, SAE Paper 2002-01-0421. <https://doi.org/10.4271/2002-01-0421>
- [16] 谢辉, 赵华, 杨林, 等. 基于可变气门定时策略的HCCI汽油机试验研究[J]. 内燃机学报, 2005, 23(6): 510-517.