

均质充量压缩着火燃烧碳氢生成和边界层贡献的试验研究

耿壮壮, 吕兴才, 广环宇, 杨 铮, 黄 震

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 试验研究了均质充量压缩着火(HCCI)燃烧过程中边界层区域 HC 生成、分布与消耗历程, 考察了边界层各个区域对整体 HC 排放的贡献比例。为此, 在快速压缩机上利用瞬态 HC 排放仪测量了均质混合气在当量比 0.4、不同压缩比下靠近气缸盖底面和气缸体侧面不同距离的各测点在全反应历程内的 HC 浓度。研究发现: 压缩比降低使得边界层效应更加明显; 同一工况下, 气缸盖底面和气缸体侧面的边界层厚度因受到压缩挤流和壁面传热的影响而不同, 气缸体侧面的边界层效应比气缸盖底面的更加显著; 靠近气缸盖底面和气缸体侧面 2mm 以内的区域对整体 HC 排放的贡献较高, 气缸中心燃烧核心区域贡献较小。

关键词: HCCI 燃烧; HC; 分布; 边界层

中图分类号: TK421+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2012)04-0001-05

Experimental Study on HC Sources and Boundary Layer Contributions of HCCI Combustion

Geng Zhuangzhuang, Lv Xingcai, Guang Huanyu, Yang Zheng, Huang Zhen

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, shanghai 200240)

Abstract: Experimental study was carried out on HC sources, distribution and consumption of HCCI combustion, and also on HC contributions of different regions of boundary layer. These experiments were conducted on an RCM using a fast response HC detector to measure the HC concentrations of different regions near the cylinder head and the cylinder liner during the combustion process with the equivalent ratio of 0.4 and different compression ratios. Experimental results show that: decrease of compression ratio makes the boundary layer contributions bigger; under the same compression ratio, the thickness of the boundary layer near the cylinder head and the cylinder liner is different because of the influences of the swirl flow and the wall heat transfer, the boundary layer effects of the region near the cylinder liner are more obvious than those of the region near the cylinder head; the HC contribution of the regions near both the cylinder head and the cylinder liner with thickness under 2mm is bigger, while the HC contribution of the core combustion region around the cylinder centerline is smaller.

Keywords: Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI) combustion; HC; distribution; boundary layer

0 引 言

传统柴油机具有热效率高、经济性好的优点, 但扩散燃烧为主的模式容易产生大量的碳烟和 NO_x。HCCI 燃烧结合传统的火花点火燃烧和压缩自燃燃烧的优点, 不仅热效率与柴油机相当, 而且

收稿日期: 2012-02-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976069/E060405)。
作者简介: 耿壮壮(1987-), 男, 硕士, 主要从事内燃机燃烧与排放控制的研究, E-mail: gengzhuang1987@sjtu.edu.cn。

碳烟和 NO_x 排放很低^[1~3]。

尽管 HCCI 燃烧有很多优点，但是 HCCI 燃烧存在一个比较显著的问题，就是 HCCI 燃烧伴随有较高的 HC 和 CO 排放，从而导致其放热率略低于传统柴油机^[4~5]。为了能够进一步提高 HCCI 燃烧热效率和燃油经济性，降低 HC 和 CO 的排放就非常重要。为此，开展了很多关于 HCCI 燃烧过程中 HC 和 CO 生成机理的研究，但是当前的研究主要以数值模拟方法为主，相关的试验研究还很少。因此，本文采用缸内快速采样技术，深入开展 HCCI 燃烧过程中 HC 产生机理的试验研究。

1 试验系统

试验是在一台快速压缩机上进行的。试验所使用的快速压缩机是以高压气体作为驱动力，利用冲击气缸原理，快速推动活塞向前运动，当活塞运动到上止点时，利用限位块以及限位手臂，使活塞停止在上止点，模拟真实发动机的压缩冲程。整个快速压缩机包括：压气机和高压储气罐，可以提供 0.1 ~ 1.0 MPa 的高压气体；驱动气缸，直径为 120 mm，工作压力为 0.3 ~ 0.8 MPa；上止点制动机构；工作气缸，直径为 50 mm。试验中通过改变活塞连杆的长度，使得压缩比可以在 8 ~ 25 之间进行灵活调整。试验系统如图 1 所示。

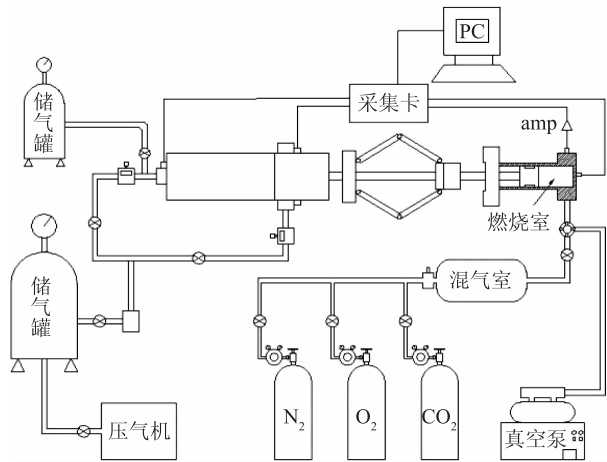


图 1 快速压缩机试验系统

本试验中，为了研究 HCCI 燃烧的 HC 生成、分布和消耗规律，采用正庚烷为测试燃料，设定当量比为 0.4，分别测试了压缩比为 8.51 和 12.38 时，气缸内的 HC 浓度。每一次试验过程都同时记录压缩初始温度、缸内气体压力历程和 HC 浓度历程。压缩初始温度由热电偶测量得到；缸内压力历程由 Kistler 6125B 压力传感器测量得到；HC 浓度历程由 Cambustion 公司的 HFR500 瞬态 HC 排放仪

测量得到。同时试验中还利用传感器记录了上止点信号，在处理数据时以时间 0 点代表上止点。

HC 排放主要产生于缝隙区域、边界层区域，因此，本次试验主要对气缸边界层附近的 HC 浓度进行了测量。分别选定靠近气缸体侧面不同距离 (0 ~ 4 mm) 以及靠近气缸盖底面不同距离 (0 ~ 4 mm) 的测点来测量 HC 浓度。对于快速压缩机，其气缸盖底面与活塞顶面的温度条件和流场条件相似，因此本文假定这两处的 HC 分布规律相同。图 2 给出了试验中瞬态 HC 排放仪测点的分布以及边界层区域的划分方法。

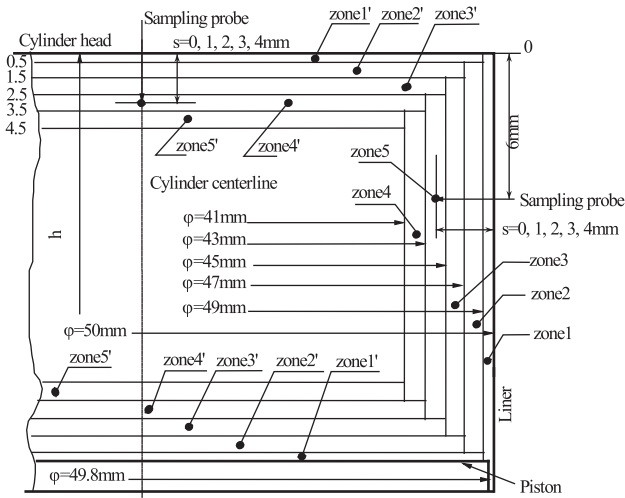


图 2 HC 测点分布和边界层区域划分

2 试验结果及分析

2.1 气缸边界层区域内的 HC 生成历程和分布规律

图 3 所示为瞬态 HC 排放仪测量得到的快速压缩机在当量比为 0.4、压缩比为 12.38 时，不同测点全反应历程内的 HC 浓度。从图中可以得到如下基本规律：

- (1) 各个测点的 HC 浓度在上止点后的一段时间内基本保持在一个水平，在达到某一时刻后 HC 浓度开始显著升高，并达到极大值，之后 HC 浓度迅速下降。这是因为可燃混合气在上止点后的一段时间内自行发生低温反应，并释放一部分热量；在低温反应阶段，由于大分子碳氢燃料主要发生裂解反应生成小分子碳氢成分，而不发生最终的燃烧反应，因此阶段后期燃烧室内的 HC 浓度会明显上升；随着低温反应放热量增加，核心区域温度上升，引起燃烧反应，反应加速。
- (2) 无论是气缸盖底面还是气缸体侧面，各个测点的 HC 浓度的极大值不同，且出现极大值的时刻也不同。一般地，靠近壁面处的测点 HC 浓度极

大值最大，出现的时刻也较晚。如前所述，HC 浓度达到极大值的过程是局部区域可燃混合气发生低温反应而尚未燃烧的过程，因此越靠近壁面处，可燃混合气平均温度越低，温升速率较慢，壁面散热效果显著，因此低温反应时间较长，且反应越充分，进而使得 HC 浓度极大值较高。而 HC 浓度出现下降主要是两种情况：当地混合气达到着火条件而发生燃烧反应；当地并未发生燃烧反应，而是核心区域完成燃烧反应后发生的传质过程或混合过程。

(4) 在各测点处，燃烧反应发生后，HC 浓度迅速下降，但在下降的后期，HC 浓度下降趋势减缓，存在一个拐点。在拐点处的 HC 浓度下降速率减缓，说明一方面该区域的可燃混合气仍然在继续氧化；另一方面，相邻区域的未燃碳氢燃料通过缸内流场运动而发生传质和交换过程。

图 4 展示了在压缩比为 8.51、当量比为 0.4 下各个测点全反应历程内的 HC 浓度，可以看出，总体规律与压缩比为 12.38 下相似，但是对比图 3 也有明显的差别。

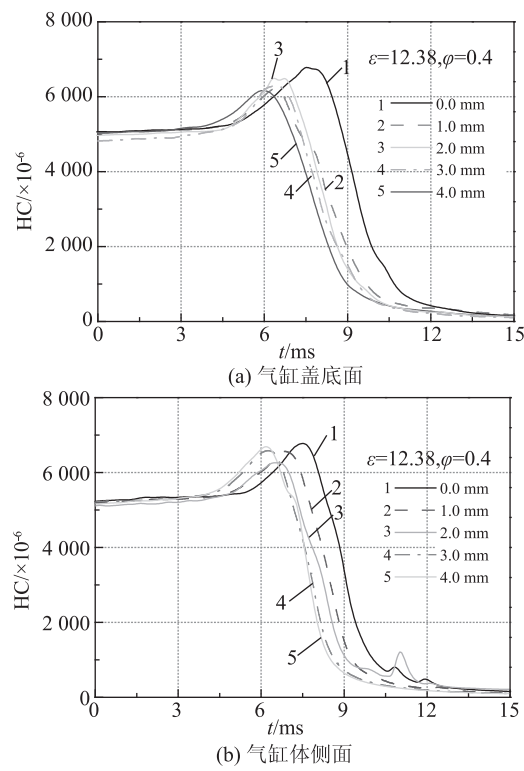


图 3 压缩比 12.38、当量比 0.4 下缸内边界层不同区域 HC 浓度历程

(3) 对于气缸盖底面，测点为 0 mm 处的 HC 浓度极大值出现时刻很晚，而其它测点这一时刻较为接近，可以认为其燃烧反应开始时刻相近，而 0 mm 位置几乎没有发生燃烧反应或程度很低。而对于气缸体侧面，测点为 0 ~ 2 mm 处的 HC 浓度极大值时刻与测点为 3 mm 和 4 mm 处的存在显著差别，这说明前者区域的可燃混合气燃烧反应不完全。特别值得注意的是，无论是气缸盖底面还是气缸体侧面，测点为 3 mm 和 4 mm 处的 HC 浓度变化几乎相同。由这些分析，可以认为：气缸盖底面的边界层较薄，大约只有 1 mm 左右；而气缸体侧面的边界层稍厚一些，大约为 2 mm；整个燃烧室内，距离壁面大于 4 mm 的区域可以认为是燃烧核心区，区域内发生完全的燃烧反应。

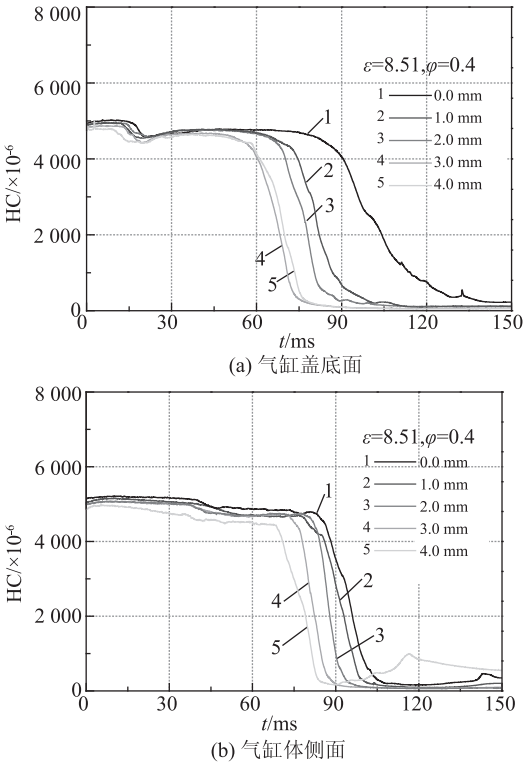


图 4 压缩比 8.51、当量比 0.4 下缸内边界层不同区域 HC 浓度历程

(1) 随着压缩比的降低，无论是气缸盖底面还是气缸体侧面，边界层厚度明显增加：在气缸盖底面，只有测点为 3 mm 和 4 mm 处的 HC 浓度变化较为一致，而 0 ~ 3 mm 各处存在显著的不同，说明此时的边界层厚度达到 3 mm 左右；而气缸体侧面，即使测点为 3 mm 和 4 mm 处的 HC 浓度变化也不相同，其边界层厚度约为 4 mm。

(2) 压缩比降低后，燃烧反应开始时刻显著推迟。燃烧反应发生后，初始阶段的 HC 浓度下降速率比高压压缩比下的要小。这主要是因为低压压缩比下，燃烧室内的平均温度不高，反应速率慢。各个区域在 HC 浓度下降的后期，并没有出现在高压压缩比下的明显的下降拐点。如前所述，HC 浓度下降拐点是是由于相邻区域 HC 的传质和交换过程造成

的,这说明低压缩比下缸内的流场流动较弱,其对 HC 的传质和交换过程的影响不显著。

(3) 低压缩比下,在上止点后的 HC 浓度变化历程中,并没有出现图 3 中高压缩比下所出现的 HC 浓度在一段时间维持不变之后浓度显著上升的现象,而在高温反应之前呈现缓慢下降趋势。这是由于低压缩比下,压缩末端的可燃混合气温度较低,不足以使燃烧室内大部分区域发生快速的低温放热反应,只有燃烧室的核心区域内发生缓慢的低温放热反应。在较长的着火延迟时间内,气缸壁面向环境传热,使得温度压力下降明显,而核心区域的放热反应和 HC 浓度升高不足以抵消这一传热效果,从而引起 HC 浓度缓慢下降或维持不变。

2.2 各个区域对 HC 排放的贡献

如前所述,在 8.51 和 12.38 这两个压缩比下,大多数情况,无论是气缸盖底面还是气缸体侧面的各个区域,在测点为 3 mm 和 4 mm 处,燃烧室内的 HC 浓度历程曲线几乎完全重合,这说明距离壁面 4 mm 以外的区域已经是燃烧核心区域了,3 ~ 4 mm 处的区域可以认为是燃烧核心区域和边界层区域的结合部位。如图 5 所示,测点为 4 mm 处的 HC 浓度历程曲线下降后期出现了速率减缓的趋势,可以认为这是边界层区域(0 ~ 3 mm 区域)未燃 HC 的扩散所致,因此可以认为此时燃烧室内的 HC 不再发生快速氧化,而只是各个区域之间的传质过程。由此可知,该时刻各个区域的 HC 浓度或数量直接决定它们对整个燃烧室 HC 排放的贡献。

为此,本文采用 4 mm 的 HC 曲线氧化速率与其传质速率的交点作为整个燃烧室内 HC 氧化反应的“冻结”时刻,如图 5 所示。对应该时刻下的各个区域的 HC 浓度决定了其对整个燃烧室 HC 排放的贡献。而测点为 4 mm 处代表了整个燃烧室核心区域的 HC 浓度,因而定义两条不同斜率曲线交点对应的 HC 浓度为核心区域的 HC 浓度。

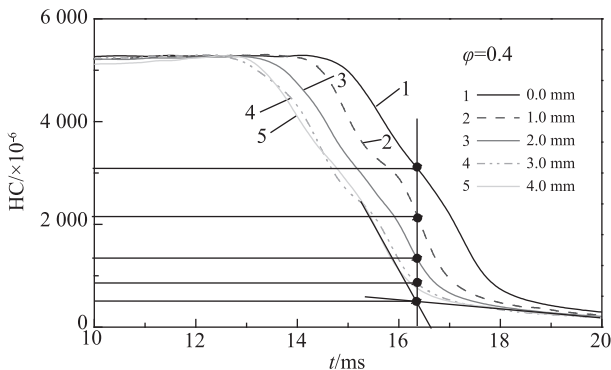


图 5 各个区域 HC 浓度的定义方法

图 6 显示了在 8.51 和 12.38 这两个压缩比下,边界层各个区域和燃烧室核心区域对整个 HC 排放的贡献比例情况。图中的 Z1 ~ Z5、Z1' ~ Z5'、Center 分别对应图 2 中的各个区域对整个燃烧室空间 HC 排放的贡献比例,且图中 Z1' ~ Z5' 分别都同时包含了气缸盖底面和活塞顶面对 HC 排放的贡献比例。从图中可以发现:

(1) 较高压缩比下,影响 HC 排放的主要区域是测点为 0 mm 和 1 mm 处的区域,其它区域对 HC 排放的贡献比例相对较小;

(2) 较小压缩比下,在测点为 0 ~ 2 mm 处的边界层区域对 HC 排放的贡献比例都比较显著;

(3) 尽管燃烧室核心区域的容积很大,但是其对燃烧室内 HC 排放的贡献比例并不高;

(4) 值得注意的是,尽管不同压缩比下的边界层对 HC 排放的贡献比例在一个数量级上,但由于低压缩比下整个未燃 HC 浓度较高,因而其贡献的绝对值也较大。

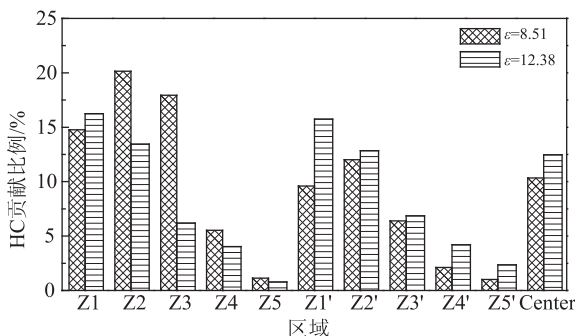


图 6 各个区域对总 HC 排放的贡献比例

3 结 论

本文在快速压缩机上开展了 HCCI 燃烧过程中 HC 生成、分布与消耗历程的研究。以正庚烷均质混合气为研究对象,在固定当量比 0.4 情况下,采用 Cambustion 公司的瞬态 HC 排放仪,分别测量了靠近气缸盖底面和气缸体侧面不同距离(0、1、2、3、4 mm)的区域全反应历程内的 HC 浓度分布,同时考察了边界层各个区域对燃烧室整体 HC 排放的贡献比例,得到如下结论:

(1) 在较高压缩比下,混合气发生明显的低温反应,燃料分子裂解成大量的小分子 HC 并释放部分热量,从而使得混合气在高温反应前缸内 HC 浓度升高并形成峰值。而采用较小压缩比时,由于着火延迟较长,低温反应速率较低、强度较弱,因此在高温着火前,缸内各点的 HC 浓度呈现缓慢下降趋势。

(2) 随着压缩比的降低, 边界层厚度明显增加, 而且 HC 高温氧化速率相对缓慢。气缸盖底面和气缸体侧面的边界层厚度不完全相同, 气缸体侧面的边界层效应比气缸盖底面更加明显。

(3) 通过对边界层各个区域 HC 排放的贡献比例的考察, 可以得到: 较高压缩比下, 影响 HC 排放的主要区域是测点为 0 mm 和 1 mm 处的区域, 其它区域对 HC 排放的贡献比例相对较小; 较小压缩比下, 在测点为 0~2 mm 处的边界层区域对 HC 排放的贡献比例都比较显著; 尽管燃烧室核心区域的容积很大, 但是其对燃烧室内 HC 排放的贡献比例并不高。

参考文献

[1] 汪映,周龙保,蒋德明,均质充量压缩燃烧方式的研究进展及存在问题[J]. 车用发动机,2002(5).

[2] Epping K. , Aceves S. , Bechtold R. , et al. The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emissions [C]. SAE Paper 2002 - 01 - 1923.

[3] Rudolf H. S, Charles E. R. . Homogeneous charge compression ignition (HCCI): benefits, compromises, and future engine applications [C]. SAE Paper 1999 - 01 - 3682.

[4] Horibe N. , Ishiyama T. . Relations among NO_x, pressure rise rate, HC and CO in LTC operation of a diesel engine [C]. SAE Paper 2009 - 01 - 1443.

[5] Bression G. , Soleri D. , Savy S. , et al. A study of methods to lower HC and CO emissions in diesel HCCI [C]. SAE Paper 2008 - 01 - 1543.

信息动态

100 艘 LNG 运输船使用了瓦锡兰双燃料发动机

在韩国船厂交付了一艘 LNG 运输船后, 瓦锡兰宣称: 现已有 100 艘船舶使用了其双燃料发动机, 占目前全球的 25%。

瓦锡兰双燃料技术在 20 世纪 90 年代初首次推出时是用于陆地动力装置的。十年后, 第一台船用 50DF 发动机装置问世。该项技术使得发动机可采用天然气、轻质燃油 (LFO) 或重油 (HFO) 运行, 同时, 运行时可以在燃料间进行无缝切换且不会产生功率或者速度损失。这确保了装置安全持续的可操作性。瓦锡兰 50DF 发动机不管使用何种燃料其输出功率都是一样的。

瓦锡兰认为, 随着 2006 年安装了第一艘 50DF LNG 运输船, 约 65% 的新建 LNG 运输船都安装瓦锡兰双燃料发动机。原因之一是 50DF 的推进效率高; 燃用燃气的环保优势是这项技术成功的另一个因素。气体模式运行时, 氮氧化物排放比国际海事组织现行法规规定的至少低 85%; 二氧化碳排放比传统燃用柴油的船用发动机少约 25%; 硫氧化物 (SO_x) 和颗粒物排放几乎为零。

此外, 正在考虑将 50DF 发动机用于其它的运输船舶, 例如, 邮轮和渡轮, 由于必须经常在排放控制区 (ECA) 航行, 所以, 它们对燃用燃气的优势有着越来越多的认识。航行于芬兰和瑞典之间的 Viking 航运公司新渡轮将成为国内最大的气体燃料渡轮。同样, 为近海石油和天然气工业服务的船只也越来越多地配备了瓦锡兰双燃料发动机。对灵活性、燃油效率、以及遵守严格的环保法规的要求是这种趋势的推动力。迄今为止, 瓦锡兰已经售出约 720 台 DF 发动机, 就该技术积累了超过 500 万小时的运行经验, 远远超过了其他发动机制造商所能提供的。

(思帆 编译)