封闭空间内正庚烷不同火焰速度对末端自燃影响的实验探究

周磊, 刘沛林, 李匡迪, 钟力嘉, 卫海桥*

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072

* E-mail: whq@tju.edu.cn

收稿日期: 2021-07-08; 接受日期: 2021-10-18; 网络版发表日期: 2021-11-15

国家自然科学基金杰出青年科学基金(编号: 51825603)和天津市自然科学基金(编号: 20JCYBJC01110)资助项目

摘要 爆轰燃烧是工程上的一种极端条件下的燃烧现象. 在发动机小型强化的过程中, 超级爆震是制约发动机进一步提升热效率、改善排放和油耗的主要瓶颈. 为了进一步揭示爆震理论, 本文基于正庚烷燃料, 在带有不同孔板的定容燃烧弹平台上开展了火焰传播速度对末端气体自燃爆震的影响研究. 首先在相同的氧浓度下, 安装不同孔隙率的孔板, 产生不同速度的火焰. 实验发现低氧浓度下均为正常燃烧模式; 而高氧浓度下, 随着火焰速度的提高, 冲击波得到了增强, 促进燃烧模式由正常燃烧向末端壁面自燃和末端两点自燃转变. 其次采用双孔板布置, 进一步加速火焰, 探究各加速条件下实现自燃的临界条件的差异. 发现更高的火焰速度可以在较低的氧浓度下实现自燃. 最后对具有相同火焰速度的不同工况的燃烧模式的对比表明, 混合气反应活性对末端自燃的产生也有重要影响.

关键词 定容燃烧弹, 末端自燃, 火焰速度, 燃烧模式, 爆轰

1 引言

环境和能源问题越来越严峻, 导致一系列油耗和排放的强制标准的出台. 为满足不断更新的节能减排要求^[1], 内燃机开始向着小型强化的方向发展^[2]. 但会造成发动机热负荷的增加, 产生爆震及超级爆震等异常的燃烧现象, 导致缸内高幅的压力振荡, 破坏机械结构, 限制了热效率的进一步提升^[3,4]. 预计到2050年, 超过半数的汽车仍然将使用内燃机作为主要动力源^[5], 因而了解并解决发动机的爆震问题很有必要.

目前, 有两种不同的理论解释爆震起因: 末端气体自燃理论和爆轰理论^[5,6]. 爆轰理论则认为火焰在传播过程中不断加速, 发展成为超音速传播, 进而产生爆震^[7]. 而末端自燃理论认为, 爆震是由于未燃气体被燃烧混合物压缩, 温度升高, 在火花塞引发的火焰到达末端之前就从一个点或多个点自燃, 并引起燃烧室中的压力振荡^[8]. 自燃理论很好地解释了光学实验的结果, 因而得到了更广泛的认可. 而超级爆震常见于低速大负荷的工况, 被认为是由火花点火前的“热点”诱发的, 伴随着爆轰现象的发生. 无论是爆震还是超级爆震都

引用格式: 周磊, 刘沛林, 李匡迪, 等. 封闭空间内正庚烷不同火焰速度对末端自燃影响的实验探究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1649–1658
Zhou L, Liu P L, Li K D, et al. Experimental study on end-gas autoignition and detonation under different flame velocities of n-heptane in confined chamber (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1649–1658, doi: [10.1360/SST-2021-0277](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0277)

涉及末端气体自燃, 并与湍流火焰-压力波的相互作用关系密切. 因此, 研究末端未燃混合物的自燃以及爆轰的形成和发展过程, 探索火焰-压力波的相互作用对于进一步解释爆震的机理有着关键作用.

爆震问题的研究已经持续了一个多世纪, 光学可视化手段的发展为研究提供了更为直观的方法. Nakajima等人^[8]使用纹影法观察比较了正常燃烧和爆震燃烧之间的差异. Smith等人^[9]在发动机爆震期间使用脉冲激光获得了尾气自燃的图像, 然而曝光时间只有20到30 ns, 无法详细分析自燃产生过程. Kawahara等人^[7,10,11]基于氢气在光学压缩-膨胀发动机中观察到爆震燃烧期间由于冲击波引起的火焰振荡以及末端气体自燃现象. 他指出, 压力震荡的强度与燃烧室中的能量密度有关. Bäuerle等人^[12]使用光谱和化学发光, 通过在爆震循环期间检测燃烧中间产物HCO的方法, 证实了末端气体自燃的发生. Wang等人^[13]基于快速压缩机开展了超级爆震过程中燃烧现象和压力变化的研究, 指出爆燃是由热点直接诱导的, 从而导致高压振荡.

上述实验从光学的角度验证了末端自燃是产生爆震的原因, 但对于自燃的产生机理还缺乏深入的探究. 在发动机中, 一般认为是温度、压力和反应活性的不均匀性导致了末端自燃. Zeldovich^[14]的开创性研究介绍了带有温度梯度的热点自燃引发的几种典型的燃烧模式: 层流火焰、强弱爆燃、均质自燃及爆轰, 被称为热点自燃梯度理论. 基于此, Gu等人^[15]和Bradley等人^[16,17]引入了无量纲参数 ξ 和 ϵ , 开发了爆震半岛理论来确定自燃模式转变的界限. Liberman等人^[18]首先提出火焰传播产生的压力波导致未燃气体的不均匀性, 从而形成热点导致自燃. Terashima等人^[19-21]模拟了完整爆震燃烧过程, 指出了火焰-压力波相互作用对末端自燃的重要性. 末端气体自燃爆轰过程还涉及了火焰、冲击波、壁面、障碍物等的相互作用. 探究不同因素对于末端气体自燃和爆震发展对于减少爆震的危害或抑制爆震至关重要.

目前爆震机理的研究大多基于理论和模拟的手段, 需要更多相关的可视化光学实验支撑. 在我们之前的实验中^[22-26], 基于氢气在装有孔板的定容燃烧弹上进行了相关的实验, 观察到了六种燃烧模式, 并详细讨论了氢气的自燃形成爆轰发展的机理及其影响因素. 但对于实际发动机中的大分子燃料探究有限, 氧浓度的提升同时改变了火焰传播速度和反应活性, 对于

某一个因素的单独分析还不充分. 本文主要基于正庚烷燃料, 首先在相同反应活性下, 通过改变孔板孔隙率探究燃烧模式转变机制; 其次, 采用双孔板方式进一步加速火焰, 探究不同火焰速度下实现自燃的临界条件; 最后对比了相同火焰传播速度下不同的燃烧模式, 进一步探究末端自燃的影响机理.

2 实验设计

2.1 实验台架

实验所使用的定容燃烧弹实验台架如图1所示. 实验台架主要包括: 定容燃烧弹弹体及孔板、进排气系统、温控系统、图像和压力采集系统、同步控制系统等. 燃烧室呈近似的圆柱形, 直径为100 mm, 长为230 mm, 总体积约为2.32 L. 在燃烧室的两侧开有跑道形观测窗口, 长230 mm, 宽80 mm. 窗口上装有高强度的光学石英玻璃, 厚度分别为50和100 mm. 弹体上方安装有型号为Kistler 6045A的压力传感器, 通过NI采集卡和高速相机相连, 采集频率和相机一致. 在燃烧室不同位置开有凹槽, 以满足不同孔板安装需求. 其中A位置距离右壁面约105 mm, B位置距离左壁面约35 mm. 实验中预混罐A预混氧气和氮气, 而预混罐B用于正庚烷和氮气的预混和加热. 由于最终燃烧室中正庚烷分压很小, 预先引入一定比例氮气, 可以减少进气误差. 预混罐B及其进气管路分别通过加热板和加热带加热以保证正庚烷汽化, 加热温度设定为

图1 定容燃烧弹实验台架示意图
Figure 1 The schematic of the test bench.

150℃并包裹有保温棉保持温度. 同时用加热板对弹体进行均匀加热, 温度设定为90℃, 即363 K, 误差在3 K以内. 纹影光路采用标准Z型光路, 燃烧过程图像通过型号为Photron FASTCAM SA-Z的高速相机采集. 实验中根据不同工况下火焰传播速度分别使用了40000和70000 FPS的拍摄速度. 同步控制系统同时触发相机图像采集、压力采集和火花塞点火.

2.2 实验条件

实验选取不同氧浓度的正庚烷-氧气-氮气作为初始混合气. 氧浓度定义为最终燃烧室中氧气在氧-氮混合气中的摩尔数占比, 具体比例根据分压定律来确定. 实验中改变混合气的氧浓度会导致初始压力、能量密度或者当量比等参数的变化, 因而不能把氧浓度作为唯一变量. 实验前期测试中发现通过降低当量比(保持甲烷量和初始压力, 增氧减氮)提高氧浓度的方法很难实现正庚烷的爆震. 而同时增加氧气和燃料, 减少氮气的方法则会大大提高高氧浓度下爆震的能量, 产生安全隐患. 综上, 本实验采用定混合气的当量比和能量密度的配气方法. 在氧浓度为21%的条件下设定初

始压力为1.5 bar (1 bar = 10^5 Pa), 在增加氧浓度的时候, 减少氮气的量, 降低初始压力. 这种方法可以在高氧浓度爆轰时降低峰值压力, 降低实验的危险性. 实验所使用的孔板为不锈钢板, 厚度为6 mm, 并在孔板上打有均匀分布的小孔. 不同孔板类型由两个参数确定: 孔径及孔隙率. 孔隙率定义为孔板上打孔面积之和在整个孔板面积中的占比:

$$\text{孔隙率} = \frac{\text{孔面积} \times \text{孔数}}{\text{孔板总面积}}. \quad (1)$$

两者对于火焰传播的影响在之前的实验^[26]中已经有所体现, 结合本次实验要求, 我们选取了相同孔径(5 mm), 不同孔隙率(6%, 12%, 18%)的孔板进行实验. 具体结构如图2所示.

另外, 实验采用了两种不同的孔板布置方式, 如图3所示. 单孔板布置方式下, 不同孔隙率孔板安装在位置A处, 对比不同火焰传播速度下燃烧模式的转变. 在此基础上, 在A前方, 即位置B处, 安装第二块孔板(孔径为5 mm, 孔隙率为18%), 从而实现双孔板布置, 进一步加速火焰传播, 并探究双孔板对于末端自燃的影响. 具体的实验条件如表1所示, 实验选择在相同的

图2 不同孔隙率孔板结构. (a) 6%; (b) 12%; (c) 18%

Figure 2 The structures of perforated plate with different porosities. (a) 6%; (b) 12%; (c) 18%.

图 3 两种孔板布置方式示意图
Figure 3 The schematic diagram of the two perforated plate configurations.

温度和当量比下进行. 需要说明, 单孔板实验中, 通过氧浓度的不断提高, 燃烧模式发生了转变. 但本文仅选取了31%和54%两个具有典型现象的氧浓度为代表, 进行详细的分析说明.

2.3 分析方法

实验以位置A处的孔板右侧面中心作为坐标原点, 燃烧室轴向和径向作为坐标轴. 火焰位置则定义为中轴线上火焰尖端与坐标原点的距离. 火焰传播速度则是根据不同时刻下火焰位置的变化来确定的, 计算公

式如下:

$$v_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i}, \tag{2}$$

式中, v_i 代表*i*张图片中的火焰传播速度, x_i 和 x_{i+1} 分别代表 t_i 和 t_{i+1} 时刻下的火焰前锋位置. 图像中每个像素点代表的实际距离为0.18 mm, 因而在40000, 70000 FPS下的测量误差分别为7.2, 12.6 m/s, 鉴于火焰经过孔板后速度较高, 误差在可接受范围. 随着火焰速度的降低, 计算过程中跳跃选取了纹影照片以增加时间间隔, 相应地降低了速度的测量误差, 总的来说误差相对于速度处于较低的水平.

3 结果与分析

之前的实验表明^[24], 氧浓度的提升会引起末端气体自燃模式的转变. 然而氧浓度的提升又会造成反应活性和火焰传播速度同时发生改变. 因而本文重点研究在相同反应活性下, 不同传播速度对于燃烧模式转变的影响. 另外, 采用双孔板的布置进一步探究不同加速效果下实现可控自燃条件的内在机理.

3.1 不同孔隙率对于末端自燃的影响

首先在较低的氧浓度(31%)下进行了不同单孔板的实验, 观察到了相似的燃烧现象, 均为正常燃烧模式. 图4以6%孔隙率的实验的纹影图为例, 来说明正常燃烧模式下火焰经过孔板后的发展过程. 图片按照时间顺序从左到右排列, 孔板位于每张图片左侧, 火焰穿过孔板后形成一个个射流火焰, 随后不同火焰面耦合形成湍流火焰, 在压力波的作用下, 火焰面产生振荡, 最终传播至燃烧室末端. 在整个过程中, 末端气体并未发生自燃爆轰. 图5给出了该氧浓度下不同孔板的

表 1 实验条件
Table 1 Experimental conditions

孔板数量	位置A孔隙率 (%)	位置B孔隙率 (%)	温度 (K)	当量比	氧浓度 (%)
单	6	—	363±3	1.0	31, 54
	12				31, 54
	18				31, 54
双	6	18			21, 31, 41, 45, 47
	12				21, 31, 41, 46
	18				21, 31, 41, 43

火焰尖端速度和压力变化情况. 6%孔隙率的孔板产生了最快的初始射流火焰, 而18%孔隙率下, 初始速度最慢. 火焰在发展过程中会产生压力波, 压力波在孔板和末端之间传播, 经过前锋时会对尖端速度产生影响, 在12%孔隙率下甚至出现短暂的反向传播. 由于没有爆轰的发生, 压力峰值仅在0.8 MPa左右. 6%孔隙率下火焰传播速度最快, 因而该条件下, 峰值压力出现得最早, 并伴随有压力振荡.

而在氧浓度为54%下, 三个孔隙率下出现了不同的燃烧模式. 图6从上到下分别显示了在54%氧浓度下

孔隙率分别为6%, 12%和18%时的火焰传播纹影图像. 起始阶段的发展和低氧浓度一样, 火焰在穿过孔板后形成射流火焰, 之后转变成湍流火焰. 而当孔隙率为6%时, 火焰前方产生了冲击波, 在火焰和冲击波传播到末端之后即产生了末端混合气的自燃. 爆轰在右壁面上下角落附近发生, 分别向着左下和左上两个方向传播, 两个爆轰波接触后逐渐转变为一个爆轰波, 向左传播, 此时的燃烧模式为末端两点自燃且爆轰. 当孔隙率为12%时, 火焰前方仍然产生了微弱的冲击波, 在抵达右侧壁面后反向传播, 并到达孔板后二次反射,

图 4 31%氧浓度下的正常燃烧模式纹影图(以6%孔隙率为例)

Figure 4 The schlieren images of the normal combustion mode at 31% oxygen concentration (take the 6% porosity as the example).

图 5 31%氧浓度下不同孔板的火焰尖端速度和压力变化. (a) 火焰速度; (b) 压力

Figure 5 The variations of the flame tip velocity and pressure with different perforated plate configurations at 31% oxygen concentration. (a) Flame tip velocity; (b) pressure.

图 6 54%氧浓度下不同燃烧模式纹影图. (a) 6%; (b) 12%; (c) 18%

Figure 6 The schlieren images of different combustion modes at 54% oxygen concentration. (a) 6%; (b) 12%; (c) 18%.

在第二次到达右壁面后在中心引发了末端混合气的自燃, 爆轰波向右传播. 此时为末端壁面自燃且爆轰的燃烧模式. 当孔隙率为18%时, 火焰前方并未形成明显的冲击波, 在压力波的作用下火焰面产生震荡, 缓慢消耗未燃混合气, 没有末端自燃及爆轰现象的产生. 和低氧浓度一样, 此时为带有火焰震荡传播的正常燃烧模式.

图7为三种燃烧模式下燃烧压力随时间变化的曲线, 燃烧模式的不同对于燃烧压力变化有着巨大的影响. 在孔隙率为6%和12%时, 由于产生了迅速传播的爆轰波, 燃烧室内压力升高较快, 且具有较高的峰值, 峰值分别达到了3.0和2.6 MPa. 而在孔隙率为18%时, 缺少了爆轰带来的剧烈燃烧以及爆轰波的作用, 压力升高较慢, 压力峰值也较低, 最高压力仅为0.8 MPa左右. 发生末端自燃的两种燃烧模式的压力峰值也存在着区别. 末端两点自燃及爆轰的燃烧模式下, 未燃混合气在两个地方同时自燃, 提高了燃烧速率, 并且两个爆轰波耦合后更强. 因而压力峰值要高于在壁面中心处的末端自燃及爆轰的燃烧模式.

图8对比了三个燃烧模式下的压力震荡, 压力震荡是对压力变化曲线进行4 KHz的高通滤波得出的. 在孔隙率为6%时, 压力震荡峰值最大, 达到2.13 MPa; 在孔隙率为12%时, 压力震荡峰值达到1.87 MPa; 在孔隙率为18%时, 压力震荡最低, 最大压力震荡幅值仅有0.32 MPa. 压力震荡幅度也是随着孔隙率的增加而降低的, 这与压力曲线的变化趋势相同, 均是由于燃烧模式不同引起的.

图7 54%氧浓度下不同孔隙率的燃烧压力

Figure 7 The pressure variation with different perforated plate configurations at 54% oxygen concentration.

图8 54%氧浓度下不同孔隙率的压力震荡

Figure 8 The filtered pressure with different perforated plate configurations at 54% oxygen concentration.

图9展示了氧浓度为54%, 孔隙率分别为6%, 12%和18%下的火焰传播速度随火焰尖端位置变化的曲线. 不同孔隙率下的火焰传播速度存在一定差异, 孔隙率为6%时的火焰传播速度最快, 基本上均超过了300 m/s, 孔隙率为18%时的最高速度刚超过了250 m/s, 孔隙率为12%时的火焰传播速度则介于两者之间. 在同样的氧浓度和初始压力下, 火焰传播速度是随着孔隙率的升高而降低的, 这与我们之前基于氢气的研究结论相同^[26]. 从变化趋势的角度来看, 不同孔隙率下均呈现“M”型变化趋势, 这是由爆轰前压力波或冲击波与火焰前锋的相互作用造成的.

综合来看, 同样氧浓度以及初始压力保证了相同的初始热力学条件, 但不同孔隙率的孔板, 产生了不同传播速度的火焰. 低氧浓度(31%)下, 火焰均为正常燃烧, 没有出现自燃和爆轰. 而在高氧浓度(54%)下, 随着火焰传播速度的提高, 燃烧模式由正常燃烧向着末端自燃且爆轰、末端两点自燃且爆轰的方向发生转变. 三种模式下的压力变化以及压力震荡均有着较大的区别. 目前认为产生末端自燃及爆轰的原因是冲击波对末端气体反复压缩, 提高了局部混合气的热力学状态, 促使混合气自燃, 并与冲击波耦合形成爆轰. 在孔隙率为18%的条件下, 火焰速度较低, 形成的压力波

图9 54%氧浓度下不同孔隙率的火焰传播速度

Figure 9 The flame tip velocity with different perforated plate configurations at 54% oxygen concentration.

较弱,无法汇聚成较强的可视冲击波,仅能使火焰发生震荡,无法将末端的未燃混合气提高到自燃所需的条件.而在孔隙率为6%和12%的条件下,末端自燃及爆轰的产生是完全符合上述机理的.其中在孔隙率为6%时,更高的火焰速度产生了更强的冲击波,使得在进行第一次压缩时就使末端气体产生了自燃.事实上,末端的混合气不仅受到了左右方向传播的冲击波作用,也受到了上下方向传播的冲击波作用,在末端壁面角落处的混合气受到两种冲击波的综合作用效果最强,故而在角落处率先产生了自燃并发展成为了爆轰.

3.2 基于双孔板湍流火焰速度对末端自燃的影响

在不同孔隙率单孔板的基础上,在每个孔板前插入一块孔隙率为18%的孔板,形成双孔板加速条件,进一步探究不同的加速条件下达到末端混合气可控自燃的条件.由于氧浓度提高会降低初始压力,因而选择最大燃烧压力 P_{Max} 与绝热平衡燃烧压力 P_{Equ} 比值作无量纲化.图10显示的是三种双孔板组合方式(18%+18%, 18%+12%, 18%+6%)下,该比值随着氧浓度的变化.每种实验条件下重复进行5次实验.绝热平衡燃烧压力由Chemkin进行零维模拟计算获得.随着氧浓度的提高,燃烧模式由正常燃烧向末端自燃且爆轰转变.在正常燃烧模式下 $P_{\text{Max}}/P_{\text{Equ}}$ 随着氧浓度增高缓慢升高,但在产生末端自燃后迅速升高.但不同孔板组合下到达爆轰的临界氧浓度存在差别.18%+6%的孔板组合在氧浓度为43%时即达到自燃的状态,而18%+12%的

图10 不同双孔板组合下最大燃烧压力与绝热平衡燃烧压力的比值($P_{\text{Max}}/P_{\text{Equ}}$)

Figure 10 The ratio of the maximum pressure to adiabatic equilibrium pressure with different types of perforated plate.

组合需要46%氧浓度才可产生末端自燃,使用双18%的孔板组合则需提高氧浓度至47%才可实现自燃.实验中,孔隙率越低,对火焰的加速效果越好,实现末端自燃时所需的氧浓度越低.

图11显示的是在不同的双孔板组合下,达到可控自燃时的火焰传播速度和燃烧压力的对比.其中,18%+6%的组合下,虽然氧浓度比另外两个低,但在火焰穿过孔板时有着最快的初始速度,但同时压力波和冲击波作用更明显,速度变化幅度更大.因而计算了三种工况下的平均速度并作对比,可以看出,仍然是18%+6%的组合有着更快的平均速度.表明在较低的反应活性下,实现更快的火焰传播速度依然可以实现燃烧模式的转变,而高氧浓度下,实现自燃所需的火焰速度较低.由于氧浓度的不同导致初始压力的不同,且爆轰后的压力具有一定的随机性,此时对比峰值压力意义不大.但从压力升高起始时间看,三者存在微小的差异,虽然18%+6%组合下火焰穿过孔板有着更快的火焰速度,然而更低的氧浓度延缓了其第二块孔板之前的传播,导致压力升高时间的略微延迟.

相同孔板布置下,氧浓度的提升会改变火焰传播速度,因而无法单纯比较氧浓度,即反应活性的影响.因而我们通过不同孔板布置产生相似的火焰传播,从而对比氧浓度改变对于燃烧模式的影响.图12显示的是氧浓度54%时12%单孔板与氧浓度41%时18%+12%

图 11 不同双孔板组合下达到可控自燃条件时的火焰传播速度和燃烧压力. (a) 火焰尖端速度; (b) 燃烧压力

Figure 11 The flame velocity and pressure under controllable autoignition conditions with different types of double perforated plates. (a) Flame tip velocity; (b) pressure.

图 12 相似火焰传播速度下的燃烧模式对比. (a) 火焰尖端速度; (b) 燃烧压力

Figure 12 The comparison of the combustion modes with similar flame velocity. (a) Flame tip velocity; (b) pressure.

双孔板组合下的火焰传播速度和燃烧压力的对比. 两种情况下, 火焰传播速度变化趋势相似, 且数值差别不大, 可以近似认为这两种情况下的火焰传播是相似的. 但由于氧浓度不同, 即反应活性存在差异, 两者的燃烧模式也是截然不同的. 单孔板下, 末端气体存在自燃爆轰发展, 出现了高的峰值压力. 由于双孔板下加速效果强, 实现相似的火焰传播速度时所需氧浓度较单孔板时更低, 此时末端没有发生自燃. 这说明, 此时燃烧模式的改变并不是之前的火焰速度变化导致的, 而是受到氧浓度的影响. 在相同火焰传播速度下, 提高反应活性可以促进正常燃烧向着末端自燃发生转变, 说明了混合气的反应活性对于燃烧模式的转变也是有

较大影响的.

4 结论与讨论

本文基于带有孔板的定容燃烧弹, 通过改变孔隙率得到不同的火焰传播速度, 并探究了火焰速度对于末端自燃的影响. 其次, 还采用了双孔板的布置方式进一步加速火焰, 探究了燃烧模式转变的影响因素以及实现末端自燃的临界条件, 主要结论如下.

(1) 在相同初始热力学条件下, 使用不同孔隙率的孔板可以得到不同火焰传播速度, 在高氧浓度下会产生三种不同的燃烧模式: (a) 末端两点自燃爆轰; (b) 末端

自燃爆轰; (c) 震荡燃烧无自燃. 随着火焰传播速度的提高, 冲击波逐渐增强, 末端自燃及爆轰更容易发生, 燃烧模式进行转变, 且燃烧压力峰值及压力振荡幅值提升.

(2) 在使用不同双孔板组合时, 高氧浓度下实现可控自燃所需的火焰传播速度较低, 低氧浓度下所需的火焰传播速度较高. 单双孔板的对比表明, 相同速度

下, 氧浓度对于末端自燃的产生也有重要影响.

总的来说, 反应活性和火焰速度的提高均增加了自燃的倾向, 低氧浓度下较高的传播速度也可以实现末端自燃. 火焰传播速度或者氧浓度的不同会产生不同燃烧模式. 末端自燃的实现需要火焰速度和反应活性的共同作用.

参考文献

- Wang J, Wang Z. Research progress of high efficient and clean combustion of automotive gasoline engines. *J Autom Safety Energy*, 2010, 1: 167–178
- Kirwan J E, Shost M, Roth G, et al. 3-cylinder turbocharged gasoline direct injection: A high value solution for low CO₂ and NO_x emissions. *SAE Int J Engines*, 2010, 3: 355–371
- Ceschini L, Morri A, Balducci E, et al. Experimental observations of engine piston damage induced by knocking combustion. *Mater Des*, 2016, 114: 312–325
- Wang Z, Liu H, Reitz R D. Knocking combustion in spark-ignition engines. *Prog Energy Combust Sci*, 2017, 61: 78–112
- Zhen X, Wang Y, Xu S, et al. The engine knock analysis—An overview. *Appl Energy*, 2012, 92: 628–636
- Affleck W S, Fish A. Knock: Flame acceleration or spontaneous ignition? *Combust Flame*, 1968, 12: 243–252
- Kawahara N, Tomita E, Sakata Y. Auto-ignited kernels during knocking combustion in a spark-ignition engine. *Proc Combust Inst*, 2007, 31: 2999–3006
- Nakajima Y, Nagai T, Iijima T, et al. Analysis of combustion patterns effective in improving anti-knock performance of a spark ignition engine. *JSAE Rev*, 1984, 13: 9–17
- Smith J R, Green R M, Westbrook C K, et al. An experimental and modeling study of engine knock. *Symposium (Int) Combust*, 1985, 20: 91–100
- Kawahara N, Tomita E. Visualization of auto-ignition and pressure wave during knocking in a hydrogen spark-ignition engine. *Int J Hydrogen Energy*, 2009, 34: 3156–3163
- Kawahara N, Kim Y, Wadahama H, et al. Differences between PREMIER combustion in a natural gas spark-ignition engine and knocking with pressure oscillations. *Proc Combust Institute*, 2019, 37: 4983–4991
- Bäuerle B, Hoffmann F, Behrendt F, et al. Detection of hot spots in the end gas of an internal combustion engine using two-dimensional lif of formaldehyde. *Symposium (Int) Combust*, 1994, 25: 135–141
- Wang Z, Qi Y, He X, et al. Analysis of pre-ignition to super-knock: Hotspot-induced deflagration to detonation. *Fuel*, 2015, 144: 222–227
- Zeldovich Y. Flame propagation in a substance reacting at initial temperature. *Combust Flame*, 1980, 39: 219–224
- Gu X J, Emerson D R, Bradley D. Modes of reaction front propagation from hot spots. *Combust Flame*, 2003, 133: 63–74
- Bates L, Bradley D, Paczko G, et al. Engine hot spots: Modes of auto-ignition and reaction propagation. *Combust Flame*, 2016, 166: 80–85
- Bradley D, Kalghatgi G T. Influence of autoignition delay time characteristics of different fuels on pressure waves and knock in reciprocating engines. *Combust Flame*, 2009, 156: 2307–2318
- Liberman M A, Ivanov M F, Valiev D M, et al. Hot spot formation by the propagating flame and the influence of EGR on knock occurrence in SI engines. *Combust Sci Tech*, 2006, 178: 1613–1647
- Terashima H, Matsugi A, Koshi M. End-gas autoignition behaviors under pressure wave disturbance. *Combust Flame*, 2019, 203: 204–216
- Terashima H, Matsugi A, Koshi M. Origin and reactivity of hot-spots in end-gas autoignition with effects of negative temperature coefficients: Relevance to pressure wave developments. *Combust Flame*, 2017, 184: 324–334
- Terashima H, Koshi M. Mechanisms of strong pressure wave generation in end-gas autoignition during knocking combustion. *Combust Flame*, 2015, 162: 1944–1956
- Wei H, Zhao J, Zhou L, et al. Effects of the equivalence ratio on turbulent flame-shock interactions in a confined space. *Combust Flame*, 2017, 186: 247–262
- Wei H, Zhao J, Zhang X, et al. Turbulent flame-shock interaction inducing end-gas autoignition in a confined space. *Combust Flame*, 2019, 204:

137–141

- 24 Zhao J, Zhou L, Zhong L, et al. Experimental investigation of the stochastic nature of end-gas autoignition with detonation development in confined combustion chamber. *Combust Flame*, 2019, 210: 324–338
- 25 Zhou L, Zhong L, Zhao J, et al. Flame propagation and combustion modes in end-gas region of confined space. *Combust Flame*, 2018, 190: 216–223
- 26 Zhou L, Gao D, Zhao J, et al. Turbulent flame propagation with pressure oscillation in the end gas region of confined combustion chamber equipped with different perforated plates. *Combust Flame*, 2018, 191: 453–467

Experimental study on end-gas autoignition and detonation under different flame velocities of n-heptane in confined chamber

ZHOU Lei, LIU PeiLin, LI KuangDi, ZHONG LiJia & WEI HaiQiao

State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Detonation is a special type of combustion phenomenon in engineering under extreme conditions and is the main bottleneck that restricts further improvement in the thermal efficiency, emission, and fuel consumption of an engine in an engine-downsizing process. To best understand the detonation phenomenon, an experiment that investigates the influence of flame velocity on end-gas autoignition and detonation is carried out in a constant-volume combustion chamber equipped with different perforated plates, which uses n-heptane fuel. First, different flame velocities are induced under the same oxygen concentration by installing perforated plates with different porosities. The results show that all normal combustion modes occur under low oxygen concentration. Meanwhile, under high oxygen concentration, the intensity of the shock waves is enhanced with the increase in the flame velocity, which promotes the transition of the combustion modes from normal combustion to end-wall and two-point autoignition. Then, double-perforated plates are used to further accelerate the flame to investigate the difference in the autoignition conditions under different acceleration conditions. We find that a higher flame velocity can induce end-gas autoignition under a low oxygen concentration. Finally, a comparison of the combustion modes under different conditions using the same flame velocity reveals that the reactivity of the mixture also significantly influences autoignition.

CVCC, end-gas autoignition, flame velocity, combustion mode, detonation

doi: [10.1360/SST-2021-0277](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0277)