DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0407-09

# 不同自燃模式对压力波动形成的影响*

续 晗[1],姚春德[1],姚安仁[2]
(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室,天津 300072;
2. 天津大学材料科学与工程学院,天津 300072)

**摘要**: 在内燃机中,HCCI(均值混合气压燃)爆震、汽油机常规爆震、汽油机超级爆震都是由未燃混合气自燃引起的化学能突然释放,从而产生振荡燃烧,但其压升率及压力振荡幅值却截然不同。为了阐明其中机理,根据上述的带震荡的燃烧压力波变化规律,提出以实验测得的放热率为基础的“能量注入法”,建立了 3 种自燃模式。通过对能量方程中的热源项进行分类改变,进而对 3 种自燃模式进行数值模拟、对其产生的压力波动进行比较分析。模拟结果表明,不同震荡特征的燃烧压力波源于不同的自燃模式,从而导致其宏观表现的压升率以及压力波振荡幅值有极大的差异。以放热率为基础的“能量注入法”能准确、快捷地探究内燃机燃烧室中压力波的形成与传播。

**关键词**: 爆炸力学;自燃;爆震;压力波动;放热率
**中图分类号**: O382 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

随着能源危机和环境危机的日益严重,内燃机作为一种由来已久的动力装置,正面临着新的技术革新。HCCI(均值混合气压燃)技术和高度强化技术作为内燃机的发展方向,受到了广泛认同。但在大负荷工况下,HCCI 技术和小型强化技术都遇到了同样的瓶颈:爆震。这阻碍了新型燃烧方式和小型强化技术在全工况范围下的应用。爆震现象由来已久,早在 1919 年,H. R. Ricardo[1] 就提出了爆震的自燃说,B. Lewis 等[2] 的补充研究证明末端气体的急剧燃烧是因为未燃混合气在着火前有先期反应的存在而产生的自燃性点火。为了衡量爆震强度及其破坏性,学者们引入了以下两个指标:最大压力振荡幅值和压升率。最早出现在传统汽油机上的常规爆震虽然压升率不高,压力振荡幅值也不大(一般小于 1 MPa),但是长期运行在爆震工况下,会对发动机机体造成损害、排放恶化。传统汽油机在小型强化的要求下引入缸内直喷、涡轮增压技术后带来的超级爆震,其压力振荡幅值骤增,可达 25 MPa,压升率也较高[3-6]。HCCI 爆震虽然压升率非常高,但是压力振荡幅值却不大[7-8]。由此可见,同是作为衡量爆震强度的两个指标,在不同的燃烧技术下却有着截然不同的表现。对于爆震的研究,主要内容是如何抑制爆震,但对自燃发生后,压力波的产生机理研究则较少,而对不同爆震现象的横向比较研究则更少。同是属于未燃混合气自燃引起的振荡燃烧现象,压力波动表现却迥然不同,本研究认为这和未燃混合气的自燃方式有着密切的联系。

## 1 物理数学模型

### 1.1 物理模型简化

本研究针对缸内直喷汽油机的锥顶型燃烧室进行数值模拟分析。为了减少计算量,首先将锥顶型燃烧室进行轴对称二维模型简化,如图 1 所示,并在数值模拟中采用轴对称坐标系 $r$-$x$。在靠近缸壁处,布置一个压力测点,用以检测缸内的压力波动。为了加快计算速度,并且提高计算精确性,利用 Y 型剖分技术对该物理模型进行分区并进行结构化网格划分。

由于研究需要捕捉未燃混合气自燃产生的压力波,而压力波的厚度较薄,为了能够更精确地捕捉到

* **收稿日期**: 2014-10-08; **修回日期**: 2014-12-26
**基金项目**: 国家自然科学基金项目(51176135)
**第一作者**: 续 晗(1990— ),男,博士研究生; **通信作者**: 姚春德,arcdyao@tju.edu.cn。

压力波，数值模拟的网格需要相对较密，为最大0.1 mm的网格特征尺度，且验证了网格的独立性，在进一步加密后，计算结果基本没有变化，但是占用内存量更大。时间步长经过试算选择为 $10^{-8}$ s，并验证了时间步长的独立性。如果加大时间步长，虽然总体计算时间降低了，但是每一个时间步并不能得到很好的收敛，甚至会出现发散；如果进一步缩短时间步长，计算结果基本没有变化，但是总体计算时间加长。由于研究的是瞬态的、高速可压流体的流动问题，所以采用的数值模拟方法是基于密度的，瞬态的方法。又由于要捕捉压力波这种非连续性流场，因而选用三阶的 MUSCL 计算格式。

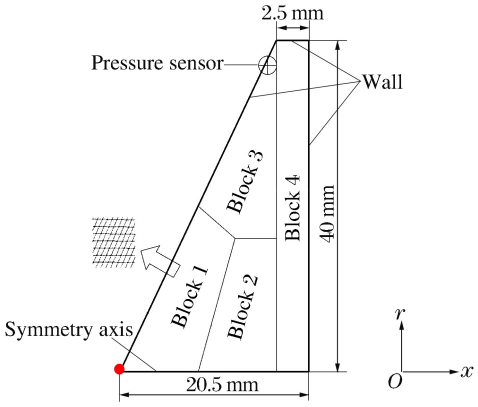


图 1 锥顶型燃烧室物理模型简化

Fig. 1 The simplification of cone roofed combustion chamber

本研究的模拟数据来源于文献[9]对小型强化汽油机超级爆震现象研究的实验数据，基于该文献中的缸压曲线和放热率曲线（见图 2）进行数值模拟分析。在第 1 个压力振荡峰之前压升率陡升的位置为爆震起始位置。从该时刻起，未燃混合气发生了自燃，从而导致压力波的形成继而引起缸内持续的压力振荡。本研究将此时刻记为数值模拟的起始时刻，并将该点设为时间坐标的零点。

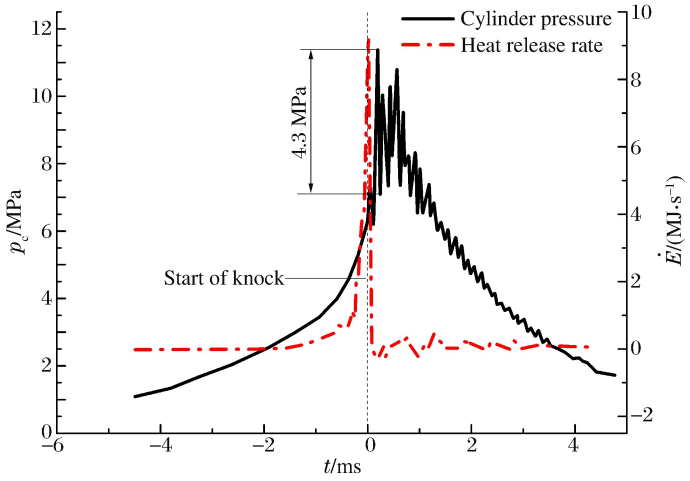


图 2 超级爆震缸压曲线及放热率曲线[9]

Fig. 2 The in-cylinder pressure curve and heat release rate curve of super knock

## 1.2 边界条件和初始条件

由于模拟的时间跨度很短，只有 0.25 ms，约合 2.8 °CA（crank angle，曲轴转角）（发动机转速为 1 850 r/min），通过壁面的传热量较少，因而对壁面采用绝热、无滑移边界条件。在这 2.8 °CA 中，活塞位移量可忽略不计，因而固定活塞位置，避免使用动网格，这样可减轻计算量。在锥顶型燃烧室的中心线处，采用轴对称边界条件。

压力初始条件如图 3 所示，由于此时末端混合气还未发生自燃，缸内还未产生压力振荡，因而全场压力一致。已燃区和未燃区的初始压力都是爆震起始时刻对应的压力值 6.3 MPa（如图 2 所示）。研究假设在已燃区和未燃区之间的燃烧火焰面上产生了 20 kPa 的微弱压力扰动，因而在该薄面上的压力赋值为 6.32 MPa。

温度初始条件如图 4 所示，已燃区的温度通过 CHEMKIN 的定容燃烧模块，以早燃开始时刻的缸内混合气温度、压力条件为初值，计算得到其定容燃烧后的温度为 2 960 K。未燃区的温度通过缸内两区热力模型进行计算[10]：

$$T_{ig}=\frac{T_{IVC}}{p_{IVC}V_{IVC}}p_{ig}V_{ig} \tag{1}$$

$$T_{SOK}=T_{ig}\left(\frac{p_{SOK}}{p_{ig}}\right)^{1-\frac{1}{\gamma}} \tag{2}$$

式中：$T_{ig}$ 为早燃时刻的缸内温度，$p_{ig}$ 为早燃时刻的缸内压力，$V_{ig}$ 为早燃时刻燃烧室容积，$T_{IVC}$ 为进气门关闭时的缸内温度，$p_{IVC}$ 为进气门关闭时的缸内压力，$V_{IVC}$ 为进气门关闭时的燃烧室体积，$T_{SOK}$ 为爆震起始时刻的缸内温度，$p_{SOK}$ 为爆震起始位置时刻的缸内压力，$\gamma$ 为缸内气体的绝热指数。通过该两区热力模型算得末端的未燃混合气温度为 918 K，已经达到了汽油的自燃温度。

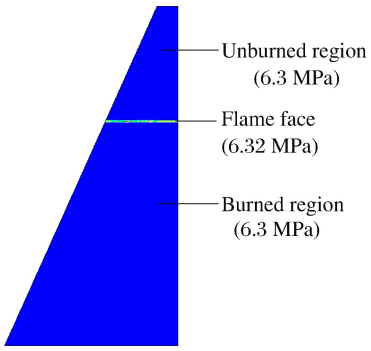


图 3　压力初始条件

Fig. 3　Initial condition of the pressure

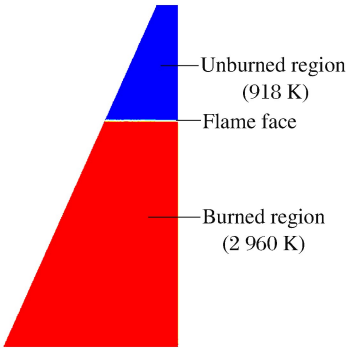


图 4　温度初始条件

Fig. 4　Initial condition of the temperature

由于是对自燃模式及其对压力波形成影响的讨论，因而主要的研究区域为末端的未燃混合气区域，对该区域的自燃情况进行分情况讨论模拟，并对其产生的压力波进行分析总结。

### 1.3　数学模型

自燃模式的探究是基于实验得出的放热率曲线进行的（见图 2）。虽然自燃模式不同，但是保证宏观的热释放率是相同的，这样不同的自燃模式之间就具有了可比性及真实性。

为了方便数学表达和数值模拟的代入，首先将实验得出的放热率曲线进行函数拟合，从而得出可以用数学公式表达的放热率。拟合函数选择 Lorentz 函数，其形式为：

$$y=y_0+\frac{2A}{\pi}\frac{w}{4(t-t_c)^2+w^2} \tag{3}$$

式中：$y$ 为拟合出的放热率，$t$ 为时间，其他参数为常数，取值为：$y_0=18\ 113.1$ J/s，$t_c=1.9\times10^{-5}$ s，$w=1.7\times10^{-4}$ s；$A=2\ 517.5$ J。

在数值求解计算过程中，每个网格都需要求解轴对称坐标系下的质量守恒方程、动量守恒方程（分别是轴向和径向）以及能量守恒方程：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r}+\frac{\rho v_r}{r}=S_m \tag{4}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial(\rho v_x)}{\partial t}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial(r\rho v_x v_x)}{\partial x}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial(r\rho v_r v_x)}{\partial r}=-\dfrac{\partial p}{\partial x}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\left[r\mu\left(2\dfrac{\partial v_x}{\partial x}-\dfrac{2}{3}(\nabla\cdot\boldsymbol{v})\right)\right]}{\partial x}+\\ \qquad\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\left[r\mu\left(\dfrac{\partial v_x}{\partial r}+\dfrac{\partial v_r}{\partial x}\right)\right]}{\partial r}+F_x\\ \dfrac{\partial(\rho v_r)}{\partial t}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial(r\rho v_x v_r)}{\partial x}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial(r\rho v_r v_r)}{\partial r}=-\dfrac{\partial p}{\partial r}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\left[r\mu\left(2\dfrac{\partial v_r}{\partial r}-\dfrac{2}{3}(\nabla\cdot\boldsymbol{v})\right)\right]}{\partial r}+\\ \qquad\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\left[r\mu\left(\dfrac{\partial v_r}{\partial x}+\dfrac{\partial v_x}{\partial r}\right)\right]}{\partial x}-2\mu\dfrac{v_r}{r^2}+\dfrac{2}{3}\dfrac{\mu}{r}(\nabla\cdot\boldsymbol{v})+\rho\dfrac{v^2}{r}+F_r\end{cases} \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\boldsymbol{v}(\rho E+p)\right)=\nabla\cdot\left(k_{\mathrm{eff}}\nabla T-\sum_{j}h_{j}\boldsymbol{J}_{j}+\bar{\tau}_{\mathrm{eff}}\boldsymbol{v}\right)+S_{\mathrm{h}} \tag{6}$$

研究主要对能量方程进行改变,从而研究不同自燃模式下的压力波形成特点。在能量方程式(6)中,$S_{\mathrm{h}}$ 代表化学反应热源项。一般的燃烧模拟中,需要引入化学反应的详细机理或者骨架机理,以求得化学反应热源项:

$$S_{\mathrm{h}}=-\sum_{j}\frac{h_{j}^{0}}{M_{j}}R_{j} \tag{7}$$

式中:$h_j^0$ 为第 $j$ 种物质的生成焓,$R_j$ 为第 j 种物质体积生成速率。但是化学反应的引入会导致计算量的急剧增加,而且本研究工作需要捕捉自燃产生的压缩波,因而计算量太大以至于无法完成。如果大量简化化学反应又会导致所求得的化学反应热源项不准确,从而导致计算结果不准确,与实验值有较大的出入。本研究合理地避开了化学反应的引入,采用以实验测得的放热率为基础的"能量注入"方法,将拟合后的放热率以数学表达式的方式注入到热源项 $S_{\mathrm{h}}$ 中,以保证整个过程的宏观放热率同实验测得的一样,从而探究不同自燃模式对压力波形成的影响。

将自燃模式分成以下 3 类:

(1)未燃混合气同时自燃。

令整体热源项 $S_0=y_0+\dfrac{2A}{\pi}\dfrac{w}{4(t-t_{\mathrm{c}})^2+w^2}$(单位:J/s);放热体积为整个未燃混合气的体积 V;则能量方程式(6)中的热源项 $S_h=\dfrac{S_0}{V}$。

将热源项代入式(6)中进行数值求解。

(2)以当地声速随着扰动波自燃。

同样令整体热源项 $S_0=y_0+\dfrac{2A}{\pi}\dfrac{w}{4(t-t_{\mathrm{c}})^2+w^2}$;

放热体积为扰动波扫过的未燃混合气的体积:$V_{\mathrm{d}}$;能量方程式(6)中的热源项

$$S_{\mathrm{h}}=\begin{cases}\dfrac{S_0}{V_{\mathrm{d}}} & \text{被扰动波扫过的未燃混合气}\\ 0 & \text{未被扰动波扫过的未燃混合气}\end{cases}$$

将上述热源项分类代入式(6)中进行数值求解。

(3)以当地声速随着扰动波自燃,并在压力波峰面加强放热。

同样令整体热源项 $S_0=y_0+\dfrac{2A}{\pi}\dfrac{w}{4(t-t_{\mathrm{c}})^2+w^2}$;加权放热体积 $V_{\mathrm{d}}$,研究将 $V_{\mathrm{d}}$ 分为两部分:被扰动波扫过并处在波峰面的未燃混合气的体积 $V_{\mathrm{d1}}$ 和被扰动波扫过但不处在波峰面的未燃混合气体积 $V_{\mathrm{d2}}$。在该自燃模式下,引入一个加强系数 $k$,用以表征波峰面的放热率是非波峰面的 $k$ 倍,则 $V_{\mathrm{d}}=kV_{\mathrm{d1}}+V_{\mathrm{d2}}$。能量方程式(6)中的热源项

$$S_{\mathrm{h}}=\begin{cases}k\dfrac{S_0}{V_{\mathrm{d}}} & \text{被扰动波扫过的未燃混合气,处在波峰上}\\ \dfrac{S_0}{V_d} & \text{被扰动波扫过的未燃混合气,但不处在波峰上}\\ 0 & \text{未被扰动波扫过的未燃混合气}\end{cases}$$

将上述热源项分类代入式(6)中进行数值求解。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 结果分析

在数值模拟计算过程中,针对每种自燃模式都进行了整体放热率的监视,监视结果表明 3 种自燃模式下的整体放热率都一样,并且等于拟合出来的 Lorentz 函数。

通过图 1 所示的“压力测点”侦测出来的 3 种自燃模式下导致的压力波动如图 5 所示。

3 种自燃模式下的最大压力振荡幅值(从上升沿到下降沿)分别为 1.35、2.63、4.83 MPa，而超级爆震实测的最大压力振荡幅值如图 2 所示，为 4.3 MPa。由此可知，汽油机超级爆震发生时，自燃模式应当遵循的是第 3 种自燃模式，即“以当地声速随着扰动波自燃，并且在压力波峰面加强放热”。

本文中用两个指标再次衡量这 3 种自燃模式下导致的不同压力波动强度：

(1)最大压力振荡幅值法：$p_{\mathrm{MAPO}}=\max|\mathrm{d}p|$，其中 $\mathrm{d}p$ 为上升沿与下降沿之间的压力差，如图 6(a)所示。

(2)爆震强度积分法：$I_{\mathrm{KI}}=\int|p_{\mathrm{t}}|\mathrm{d}t$，其中 $p_{\mathrm{t}}$ 为高通滤波之后，随着时间变化的压力值，如图 6(b)所示。

从图 6 可知，这 2 种评价指标都显示“同时自燃”模式下的压力振荡最小，而“以声速自燃并且在激波面上加强放热”的自燃方式压力振荡最大。而压力波对零部件的破坏作用主要是通过 MAPO 的方式进行衡量，因为压力振荡幅值越大，对零部件的冲击破坏作用就越大。模式 3 的 $p_{\mathrm{MAPO}}$ 值是模式 1 的 3.6 倍，其冲击破坏作用是相当大的。

通过数值计算得出的压力云图可以更加清楚地探究在这 3 种自燃模式下压力波形成的原因及区别。如图 7 所示为各个时刻下，不同自燃模式下的压力云图。

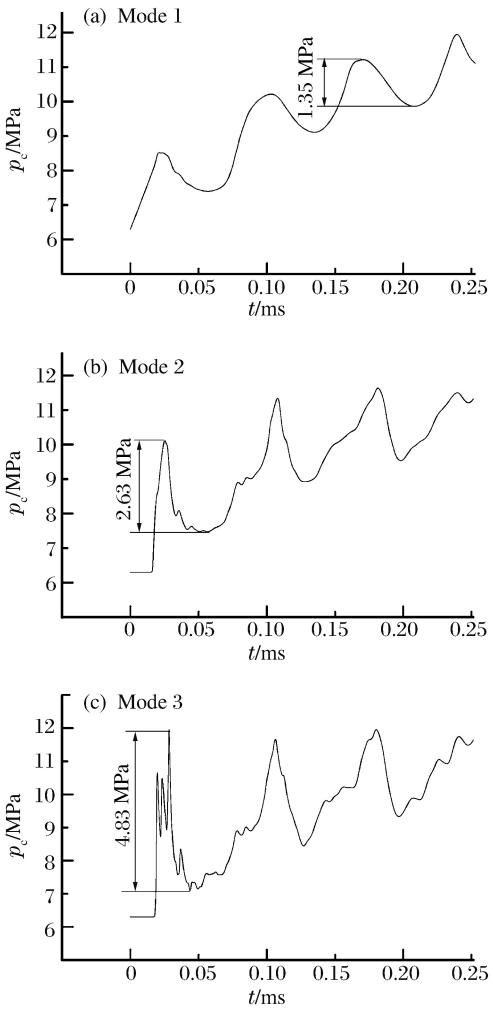


图 5　3 种自燃模式下的缸压曲线

Fig. 5　Cylinder pressure under three kinds of autoignition mode

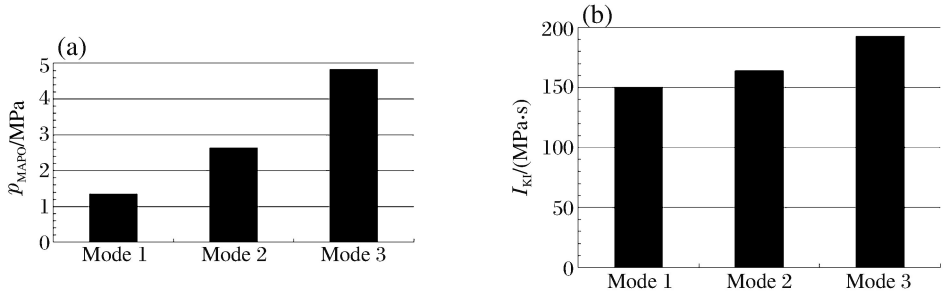


图 6　不同自燃模式下的 $p_{\mathrm{MAPO}}$ 值和 $I_{\mathrm{KI}}$ 值

Fig. 6　Value of $p_{\mathrm{MAPO}}$ and $I_{\mathrm{KI}}$ in different autoignition modes

如图 7(a)所示，3 种自燃模式下，在开始阶段，燃烧产生的小扰动都在不断向顶端传播。如图 7(b)所示，由于自燃模式 1 是未燃混合气整体自燃放热，所以未燃混合气部分的压力表现出整体升高的趋势，并且不断地向燃烧室中心传播压缩波。而最开始的小扰动波则逐渐耗散不见。对于自燃模式 2 和

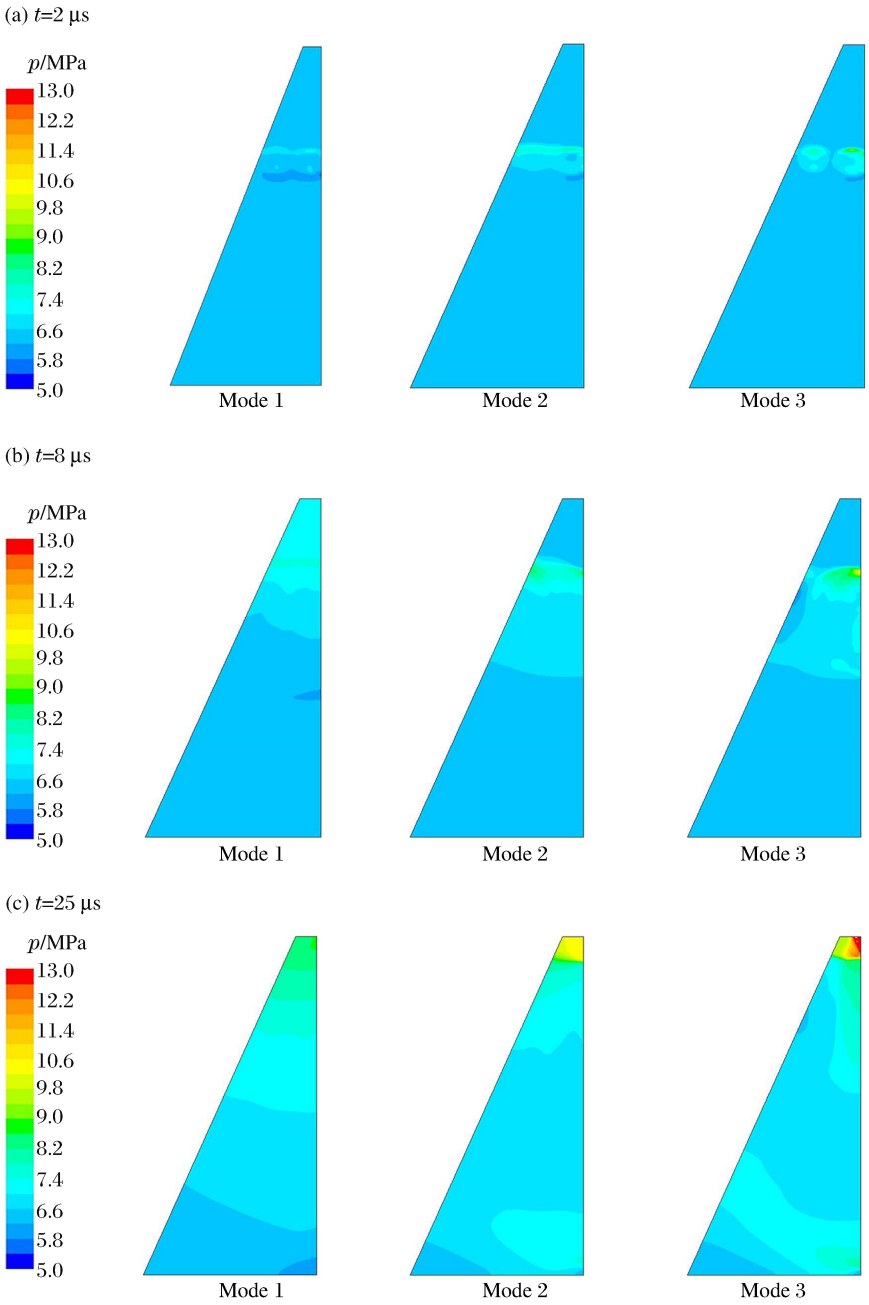


图 7 不同自燃模式下不同时刻的压力云图

Fig. 7 Pressure contour of different auto-ignition modes at different times

自燃模式 3 而言，小扰动波扫过的区域，未燃混合气才开始放热。未燃混合气自燃放热产生的压缩波向两个方向传播，一个方向同自燃模式 1 一样，向燃烧室中心传播，另一个方向则与小扰动波方向相同，向顶部传播，表现出后波追赶前波的现象，因而小扰动得到逐步的加强。而自燃模式 3 由于在波峰面上有加强的放热，因而波峰处的压力梯度相对于自燃模式 2 而言更大，压力波的强度也就更大。随着压力波的传播，自燃放热的进行，这种差异逐渐变大。如图 7(c)所示，为压缩波碰壁反射后的情况，由于入射波和反射波在此刻有叠加作用，因而该时刻的压缩波差异表现得更加明显。自燃模式 1 下的压力云图还是同最开始的一样，呈现出整体压力升高，并不断地向燃烧室中心传播压缩波。自燃模式 2 和自燃模式 3 下都有压缩波的反射汇聚现象，而由于自燃模式 3 的压缩波更为强烈，因而其反射汇聚的情况也更加剧烈，在局部区域超过了 13 MPa。

## 2.2　讨论

这 3 种自燃模式导致的不同压力振荡现象可以用来解释 HCCI 爆震、汽油机普通爆震与汽油机超级爆震的不同压力振荡表现。

据文献[7]中对 HCCI 爆震燃烧的研究可知，HCCI 爆震燃烧时，在第 1 个压力波峰前的最大压升率为 2.96 MPa/°CA，而其最大压力振荡幅值却只有 0.85 MPa。图 2 所示的超级爆震，在第 1 个压力波峰前的最大压升率为 1.6 MPa/°CA，但是其最大压力振荡幅值却可达到 4.3 MPa。未燃混合气的不同自燃模式可以很好地解释这种现象：由于 HCCI 燃烧是多点同时着火的燃烧方式，没有传播的火焰面，因而其在充量的能量密度足够大的情况下，即进入足够多的燃料和空气的情况下，便会发生爆震燃烧，产生压力波动。其自燃模式属于模式 1，即未燃混合气同时着火。因为是大量的未燃混合气在同一时刻同时着火，因而其压升率很高。但其最大压力振荡幅值却较低，这是因为未燃混合气的放热并未和燃烧产生的轻微扰动耦合起来。而汽油机的超级爆震产生时，可燃混合气已经燃烧了 50%多[6]，剩下的未燃混合气才发生自燃，因而其压升率并没有 HCCI 燃烧的高，但是由于其有火焰传播过程，燃烧产生的扰动和未燃混合气的自燃速度一旦耦合起来，进入第 3 种自燃模式，则会加剧扰动波，进而发展为冲击波，从而宏观变现为较高的压力振荡幅值。

汽油机的常规爆震是由于点火过于提前引起的末端混合气自燃。自燃的末端混合气的量相比于早燃引起的超级爆震是较少的。又由于没有增压，因而常规爆震的末端未燃混合气的能量密度较低，所以即便未燃混合气的自燃速率和燃烧产生的扰动波耦合起来了，也没有足够的空间和能量让扰动波发展变强转戾为冲击波，因此常规爆震往往就退化成了第 1 种自燃模式。其压升率和最大压力振荡幅值都较低。但是如果传统汽油机在大负荷下发生了爆震，由于其进气量大，喷油量多，末端发生自燃的未燃混合气量就较多，此时倘若第 2 种自燃模式发生，那么爆震的压升率和振荡幅值也会升高，长期工作在该工况下，发动机的零部件受到不断冲击，将会发生破坏失效。

近年来，天然气作为一种汽油替代燃料被广泛应用于点火式发动机中。由于天然气的火焰传播速度较慢，那么在由火花塞跳火引起的火焰面到达末端混合气之前，末端未燃混合气量相比于汽油来说会较多，一旦发生第 2 种模式的自燃，其压升率和振荡幅值也会比传统爆震高，对于发动机零部件的冲击破坏同样严重。

在汽油机超级爆震的研究中也有学者提到过以声速自燃的这种自燃模式。根据 X. J. Gu 等[11]的研究结果，未燃混合气的自燃速度 $u_a=\left(\frac{\partial \tau_i}{\partial r}\right)^{-1}=\left(\frac{\partial \tau_i}{\partial T_0}\frac{\partial T_0}{\partial r}\right)^{-1}$，其中 $\tau_i$ 为滞燃期。对于同种燃料，化学性质一样，$\frac{\partial \tau_i}{\partial T_0}$ 则是固定的常数。那么自燃速度主要取决于温度梯度 $\frac{\partial T_0}{\partial r}$，如果有一个合适的温度梯度 $\left(\frac{\partial T_0}{\partial r}\right)_c$ 使得 $\left(\frac{\partial \tau_i}{\partial T_0}\right)^{-1}\left[\left(\frac{\partial T_0}{\partial r}\right)_c\right]^{-1}=a$，其中 $a$ 为声速，那么就有可能形成极强的压力波，从而导致超级爆震的出现。但是本研究发现，如若只是满足温度梯度达到自燃速率同声速一样还是不够的。这种效果如同自燃模式 2 一样，虽然压力幅值有所增加，但是最大只有 2.63 MPa。要达到实验测得的 4.3 MPa 的压力幅值，激波面上应有加强放热，类似于自燃模式 3。这是由于激波面的压力更高，对未燃混合气或者是已经开始自燃的中间产物具有强烈的压缩作用。根据质量作用定律：反应速率 $r=k\prod_i c_{A_i}^{\alpha_i}$。其中 $k$ 为反应常数，$c_{A_i}$ 为第 $i$ 种反应物的物质量浓度。激波面的强压缩作用，导致激波面处反应物或者中间产物的物质量浓度 $c_{A_i}$ 升高，除此之外，由于激波的绝热压缩，导致激波面的温度也略有上升，从而使得 $k$ 也有所增加。两个方面共同作用下，反应速率加快，那么放热速率也会加快，这就解释了自燃模式 3 的内在机理。举例而言，对于自燃过程的中间产物 OH。在激波面上，OH 的物质量浓度升高，导致 OH 与其他中间产物反应生成 $H_2O$ 的放热反应急剧加快，从而在激波面上放热增强，构成了模式 3 的自燃机理。

Z. Wang 等[6]的研究结果表明，如果未燃混合气的热力学状态达到了爆轰线以上，那么未燃混合气

就会形成爆轰波,从而导致超级爆震。本研究认为,末端混合气的热力学状态达到了爆轰线以上,但是如果同时发生自燃,那么也无法形成强烈的耦合压缩波,就如同自燃模式 1 一样,其引起的最大压力振荡幅值只有 1.35 MPa,类似于 HCCI 爆震。

## 3 结 论

HCCI 爆震、汽油机常规爆震以及汽油机超级爆震同样是属于未燃混合气的自燃。倘若自燃方式不同,形成的压力波强度则不同,宏观表现出的缸压振幅也就不同。研究工作将自燃模式分为三类,进行数值模拟并将结果进行分析讨论。

(1)HCCI 爆震遵循了第 1 种模式的自燃。爆震发生时,压升率很高,但是其振幅却不够大。这是由于 HCCI 是混合气整体着火,所以压升率高,但是振幅小。

(2)普通爆震也属于第 1 种自燃模式。其压升率较低且振幅也较低。其原因是普通爆震自燃的未燃混合气量少,能量密度也不高。但是,如果发生在大负荷条件下,由于参与自燃的末端混合气量较多,则可能会发生第 2 种模式的自燃,对燃烧系统产生较大的破坏力。

(3)超级爆震遵循了第 3 种模式的自燃方式。该状况发生时,在压力波波峰处会有绝热压缩,导致放热加强,当地的化学反应速度加快。不仅压升率大,而且燃烧压力的震荡频次高、振幅也很大,具有很强的破坏力。倘若超级爆震只是遵循第 2 种模式的自燃方式,其得到的压力波强度不会高,压力振幅也不大。增压缸内直喷汽油机如果发生早燃,其时参加燃烧的混合气量多,易于诱发高破坏力的超级爆震产生。

(4)能量注入法便于开展自燃模式的数值研究。该方法基于实验测得的放热率,避开了复杂的化学反应过程,缩短了计算时间,降低了计算成本,同时能保证获得宏观放热率和实验结果相同的计算结果。

## 参考文献:


[1] Ricardo H R. The high speed internal combustion engine[M]. US: Interscience Publishers, inc, 1941.

[2] Affleck W S, Fish A. Knock: Flame acceleration or spontaneous ignition? [J]. Combustion and Flame, 1968,12(3):243-252.

[3] Zahdeh A, Rothenberger P, Nguyen W, et al. Fundamental approach to investigate pre-ignition in boosted SI engines[J]. Sae International Journal of Engines, 2011,4(1):246-273.

[4] Dahnz C, Han K M, Spicher U, et al. Investigations on pre-ignition in highly supercharged SI engines[J]. Sae International Journal of Engines, 2010,3(1):214-224.

[5] Dhnz C, Spicher U. Irregular combustion in supercharged spark ignition engines—pre-ignition and other phenomena [J]. International Journal of Engine Research, 2010,11(6):485-498.

[6] Wang Z, Liu H, Song T, et al. Relationship between super-knock and pre-ignition[J]. International Journal of Engine Research, 2015,16(2):166-180.

[7] Wang Q, Wei L, Pan W, et al. Investigation of operating range in a methanol fumigated diesel engine[J]. Fuel, 2015,140:164-170.

[8] 柳茂斌,何邦全,袁杰,等. 正丁醇-汽油 HCCI 发动机燃烧特性[J]. 内燃机学报,2013,31(4):324-330.
Liu Maobin, He Bangquan, Yuan Jie, et al. Combustion characteristics of a HCCI engine fuelled with n-butanol-gasoline blends[J]. Transactions of CSICE, 2013,31(4):324-330.

[9] Amann M, Alger T, Mehta D. The effect of EGR on low-speed pre-ignition in boosted SI engines[J]. Sae International Journal of Engines, 2011,4(1):235-245.

[10] Rudloff J, Zaccardi J M, Richard S, et al. Analysis of pre-ignition in highly charged SI engines: Emphasis on the auto-ignition mode[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013,34(2):2959-2967.

[11] Gu X J, Emerson D R, Bradley D. Modes of reaction front propagation from hot spots[J]. Combustion and Flame, 2003,133(1/2):63-74.

# Effect of different auto-ignition modes on the formation of pressure waves

Xu Han[1], Yao Chunde[1], Yao Anren[2]

(1. *State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*;
2. *School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*)

**Abstract**: In internal combustion engines, different combustion technologiescan result in different knocks, such as the conventional knock of gasoline engines, the super knock and the knock of HCCI engines. Though they are all caused by the auto-ignition of unburned mixture which leads to the oscillation burning, the rising rate and the oscillation amplitude of their pressure are totally different. In order to explore the inner mechanism working behind them, three kinds of auto-ignition modes were built up to illustrate the different phenomena of pressure oscillations under different combustion technologies. The differences of these three kinds of auto-ignition modes in engines were clarified. In the method of "Energy Injected", the heat source term of the energy equation can be changed based on the heat release rate obtained from experiments, and then a series of numerical simulations were conducted to realize these three kinds of auto-ignition modes. The numerical simulation shows that different auto-ignition modes will lead to different pressure waves, which can explain the different pressure rising rate and pressure oscillation amplitude. The method of "Energy Injection" based on the experiment measured heat release rate can accurately and rapidly identify the formation and propagation of pressure waves in the engine combustion chamber.

**Key words**: mechanics of explosion; auto-ignition; knock; pressure oscillation; heat release rate

(责任编辑　曾月蓉)