

# 爆震燃烧现象的研究及其特性分析

## Study and Characteristic Analysis on Knocking Combustion

周逸帆 梁毅 张玉银

(上海交通大学)

**摘要:** 本文采用了 Converge 软件, 耦合了化学反应动力学机理和 G 方程, 建立了长方体定容燃烧室的爆震燃烧三维 CFD 模型, 模拟仿真了爆震燃烧的压力振荡现象, 并对初始混合气温度、初始混合气压力和末端壁面温度三个因素进行解耦并分析, 确定了各因素对爆震燃烧特性的影响, 为后续将较为高效的爆震燃烧应用于发动机上提供坚实的数据支持。

**关键词:** 爆震、发动机、CFD、压力振荡

**Abstract:** This paper uses the Converge software and couples chemical reaction kinetics mechanism with G-Equation to build a 3D Computational Fluid Dynamics (CFD) model of the knocking combustion in a constant volume combustion chamber. The pressure oscillating phenomenon in it has been simulated. The influences of the initial pressure, the initial mixture temperature and the end wall temperature on knocking combustion have been analyzed independently. This study provides solid data support for the application of the efficient knocking combustion to the engine.

**Key words:** Knocking、Engine、CFD、Pressure oscillation

## 1. 绪论

### 1.1 爆震燃烧现象简介

爆震(Knocking, 又称 Deflagration)是火花点火发动机常在压缩比较高时出现的一种非正常的燃烧现象, 它自发和随机地产生, 导致锐利的压力脉冲。发动机的爆震容易伴随敲缸现象, 导致零部件产生裂纹<sup>[1-4]</sup>。一般情况下, 发动机负荷越大时发生的爆震现象越强烈, 因此爆震现象限制了火花点火发动机通过不断提高压缩比方法来提高热效率以改善发动机的性能。

### 1.2 爆震燃烧研究意义

国内汽车的产销量相较于十几年前已经翻了十倍以上, 目前仍在稳定增长。随着世界性能源危机和环境污染的日益加剧, 更加严格的排放法规被提出, 意味着对发动机技术提出了更高的要求, 如何提高发动机热效率并且减少排放成为了内燃机研究领域的热点问题。发动机小型化是提高发动机热效并且减少排放的重要手段, 然而需要使用增压技术来保证发动机动力性能<sup>[5]</sup>, 但是发动机增压时常会导致发动机发生爆震燃烧, 爆震现象使得发动机开放商不得不降低压缩比避免发生爆震, 对发动机热效率的提高设置了障碍<sup>[6]</sup>。

爆震现象对于发动机不一定是有害的, 研究和实验证明了轻微爆震不会破坏发动机的正常运行, 反而可以提高发动机的效率, 甚至如脉冲爆轰发动机(PDE)是利用爆轰波产生推动力工作的<sup>[7]</sup>。这是因为发动机爆震燃烧过程的时间相当短暂, 平衡反应没有充足的时间, 燃烧过程接近等容燃烧, 热效率高于等压燃烧。若既能提高发动机的压缩比, 又能合理有效地利用爆震, 发动机的热效率将会得到极大的提高, 也会大幅降低温室气体的排放。要合理利用爆震必须对爆震现象及其机理和特性有清晰的认识, 系统地掌握各参数对爆震的影响规律。

### 1.3 爆震燃烧研究现状

Mallard 和 Le.Charelier 等人于 1882 年在进行火焰传播试验时发现了爆震现象<sup>[8]</sup>。Ricardo.H.R 第一个提出了发动机爆震是由末端气体自燃引起的学说<sup>[9]</sup>。L.Withrow 和 G.M.Rassweiler 于 1936 年通过试验发现和证实了在火花点火形成的火焰完成燃烧之前末端的未燃混合气发生的自燃现象，并发现了末端混合气自燃后的压力急剧升高及震荡的现象<sup>[10]</sup>。在 1937 年前后，Lewis 等人的研究同样提到了末端混合气存在着火前的化学反应，并且认为是这些着火前的化学反应使得混合气自燃，最后导致末端混合气的急剧燃烧引发爆震<sup>[11]</sup>。

W.S Affeleck 和 A. Fish 于 1968 年通过观察在快速压缩机上的实验压力曲线以及火焰传播过程的散射光谱和反应产物，发现末端混合气自燃理论适用于解释实验现象<sup>[12]</sup>。很多实验结果也支持自燃理论解释爆震现象，爆震已被广泛认为是由末端混合气快速燃烧放热导致<sup>[13-14]</sup>。

学者们提出了一些用于模拟自燃过程的模型，如基于阿伦尼乌斯函数（Arrhenius function）的经验公式模型，用于确定火焰前锋面在消耗完末端混合气之前爆震是否会发生<sup>[15]</sup>。此外，现在已经有越来越多不同的模型专门用于描述对应燃料的氧化反应及自燃的原理。

非计算机辅助计算的机理模型的发展如图 1-1 所示，早期具有代表性的是 Shell 模型，包括反应的起始(initiation)，反应链的传递(chain propagation)，支链分支退化(degenerate branching)和反应终止(termination steps)<sup>[16]</sup>。在此基础上引入了 Globalized species 来描述反应，发展了 Cox and Cole 模型<sup>[17]</sup>，Hu and Keck 模型和 Griffiths 模型<sup>[18]</sup>。Hu 和 Keck 于 1987 年提出的支链动力学模型(Hu and Keck)可用于预测球形定容弹的爆炸极限和快速压缩机上的着火延迟<sup>[19]</sup>。Tanaka 模型考虑了壁面传热和层流边界的位移影响<sup>[20]</sup>。Curran 和 Gaffuri 等人在低温和高温条件下利用反射激波后的实验结果提出了关于正戊烷及异辛烷计算机理模型(Livermore group)<sup>[21]</sup>。

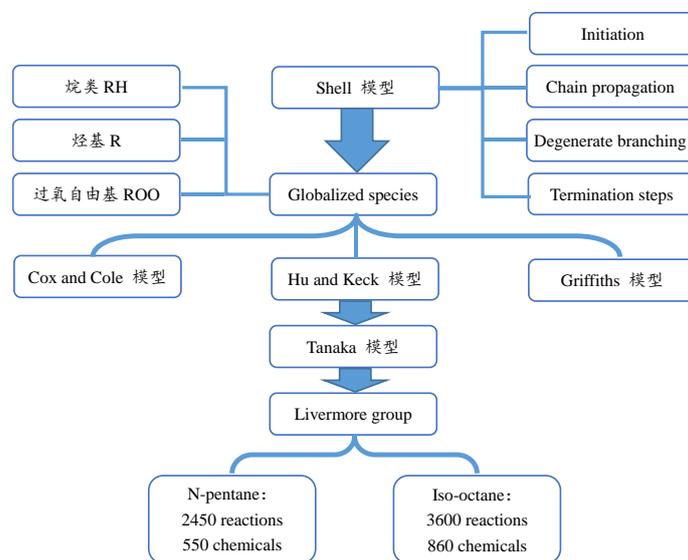


图 1-1 非计算的爆震机理

Fig.1-1 Knocking mechanism of non-computation

计算机辅助计算的机理模型具有代表性的是由 Ranzi 和 Faravelli 等人在 1995 年提出用于模拟正庚烷的简化化学反应机理和在 1997 年提出用于模拟异辛烷的简化化学反应机理的动力学模型，它是基于迭代算法的化学反应机理，可用于精确计算中间产物、放热率和着火延迟等参数<sup>[22]</sup>。Ziegler 和 Fournet 等于 2005 年根据 Thergas 软件搭建提出了丙烷的化学反应机理模型<sup>[23]</sup>。

清华大学和美国威斯康辛麦迪逊大学合作研究发动机从末端混合气自燃到爆震这段时间内的反应情况,使用基于 KIVA 软件中的 G-equation 模型,利用 ERC PRF 简化模型(47 产物, 132 反应)模拟火花点火形成的火焰前锋面前的自燃的产生和火焰前锋面后的已燃区后氧化反应,同时利用一种改进的壁面热传导模型来模拟壁面传热,从仿真模型结果可以看出,发动机发生爆震时缸内的压强分布是很不均匀的,压力波动及化学反应同时发生,且交互影响<sup>[24]</sup>。

以上的学者们对发动机的爆震燃烧方面做了很多非常有意义的研究,但是仍然还没有完全阐明发动机的爆震燃烧机理。虽然现在许多化学模型被用于模拟低温氧化反应及自燃的产生,但是在发动机爆震燃烧方面仍然没有一个非常准确的模型,从末端混合气自燃到压力振荡的具体过程以及压力波对爆震燃烧过程中化学反应的影响尚且未知。

## 1.4 本文主要工作

虽然国内外大量的研究者对发动机的爆震燃烧机理进行了许多研究,但并未将各变量解耦并独立地系统地研究各变量对爆震燃烧特性的影响,未确定发生爆震燃烧时各变量的取值边界。本文采用 Converge 软件,耦合了化学反应动力学机理和 G 方程,并建立了相应的传热模型、湍流模型、点火模型等,最终构成了长方体定容燃烧弹内的爆震燃烧三维 CFD 模型,并对初始混合气温度,初始混合气压力和末端壁面温度三个因素进行解耦并分析各因素对爆震燃烧特性的影响,从而确定各因素的极限界限以及其与爆震燃烧特性之间的影响关系,探明发动机的爆震燃烧机理,为加快后续将较为高效的爆震燃烧应用于发动机上提供坚实的数据支持,这对于实现将爆震合理利用于发动机具有极大的帮助,同时对于提高发动机热效率和燃油经济性、降低发动机排放具有重要的现实意义。

## 2. 爆震燃烧数值仿真模型建立

考虑到 CFD 耦合化学反应动力学机理的计算成本,选用合适的计算软件非常重要,作为新一代的计算流体力学软件 Converge 可自动生成正交性网格以及可调用自适应网格加密网格技术对关键处进行网格细化,该软件既可以控制较低的计算成本又可以尽可能地保证高精度的计算结果。

### 2.1 数值仿真模型的选取和验证

考虑到燃烧过程主要受火焰传播速度和低温反应的影响,本文采用 G 方程模型和化学反应动力学基元反应相结合模拟爆震燃烧。燃烧过程中可能出现从静止到强湍流的转变,本文采用了 Converge 软件中的 RNG k- $\epsilon$  湍流模型<sup>[25]</sup>。同时爆震燃烧时壁面传热受到气体压缩影响,末端壁面的传热对于末端混合气的自燃影响很大,本文采用 Han 和 Reitz 的壁面传热模型<sup>[26]</sup>。燃烧弹内部设置充满当量比为 1 的均匀的正庚烷/空气混合气。

为了确认以上计算模型的准确性,本文首先使用 Tinaut 试验数据进行模型的压力验证,Tinaut 等人的实验是使用正庚烷燃料在直径为 200 mm 的球形定容燃烧器上进行的,混合气当量比为 1,初始压力 2MPa,壁面温度和混合气温度均为 443K<sup>[27]</sup>。从图 2-1 可以看出,球形定容燃烧器的计算结果和实验结果基本吻合,说明本文的计算模型能正确反映出燃烧特性。

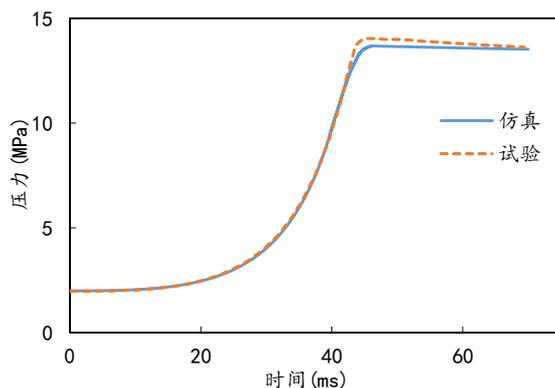


图 2-1 仿真与试验压力 [62]

Fig.2-1 Pressure in experiment and simulation<sup>[62]</sup>

除了进行压力验证外，还对数值仿真模型进行了实际爆震现象的验证，使用 50 mm×50 mm×250 mm 的长方体燃烧定容弹进行了初始压力为 1MPa，初始气温为 430K，末端壁面温度为 350K 工况下的实验，通过高速摄影的照片可以观察到在定容燃烧器的末端火焰尚未传播到的地方局部出现了自燃的着火点，如图 2-2，且实验中燃烧器内发出刺耳的金属敲击声，因此该工况下发生了爆震现象。采用所建立的模型进行了 50 mm×50 mm×250 mm 尺寸下数值模拟的结果如图 2-3，可以看出末端压力曲线有明显的振荡，因此本文设置的模型可以成功模拟实际的爆震现象。

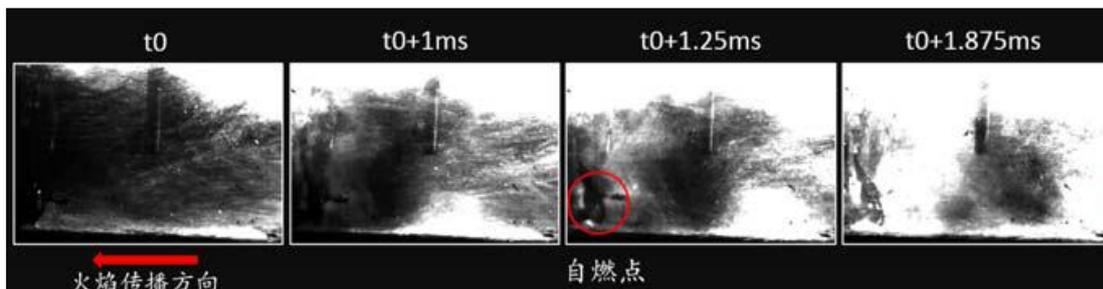


图 2-2 实验中燃烧器末端的火焰形态

Fig.2-2 The flame pattern at the end of the chamber in the experiment

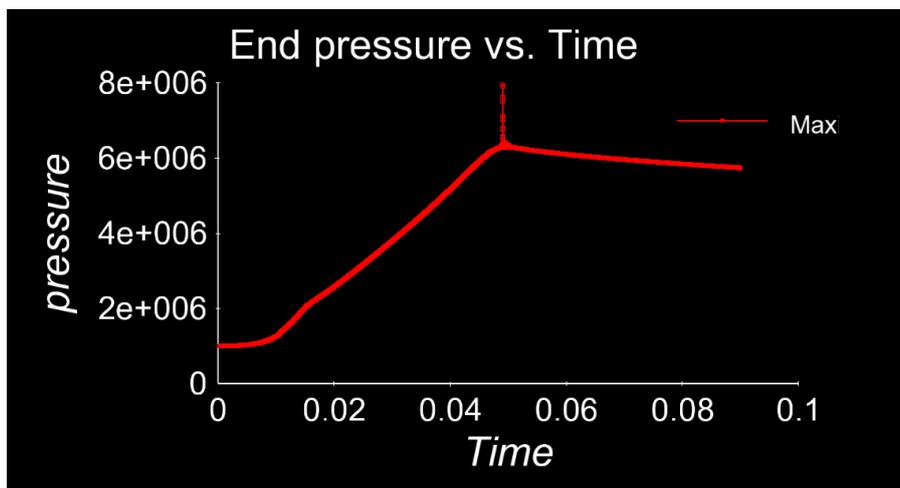


图 2-3 使用 Converge 软件模拟得到的末端压力曲线

Fig.2-3 The end pressure curve simulated by Converge software

## 2.2 数值仿真计算模型的建立

定容燃烧弹如图 2-4，A 点距离末端壁面 5 mm，为末端混合气压力温度的数据采样位置。采样时间间隔设为  $5 \times 10^{-6}$  秒以捕捉到爆震燃烧过程。火花塞布置在距离右端壁面 5 mm 的 B 点，内部充满当量比 1 的正庚烷与空气均质混合气。在同一个位置采用总能量为 500 mJ 的两个热点模拟实际火花塞点火时的电容放电和电感放电过程以保证点火成功。

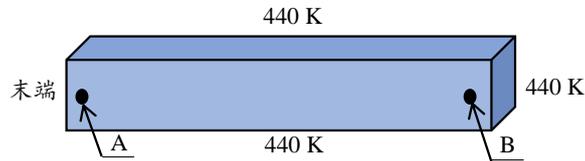


图 2-4 长方体燃烧弹示意图

Fig.2-4 Schematic of rectangular combustion bomb

本文建立了  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的卧式长方体定容燃烧弹几何模型，采用笛卡尔网格，初始网格为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ，计算中程序根据温度梯度和速度梯度自适应加密到最小边长为  $0.5 \text{ mm}$ ，点火附近固定加密到  $0.125 \text{ mm}$ ，网格设置参考了 Yang<sup>[28]</sup> 等的模型。计算过程中动态网格如图 2-5，从火花点火开始始终保持着正方形网格，根据温度梯度和速度梯度进行加密，每次加密时边长变为一半，在火焰锋面传播过程中始终是加密到最小边长为  $0.5 \text{ mm}$  的正方形网格，可以保证在整个火焰发展传播过程较高的计算精度。

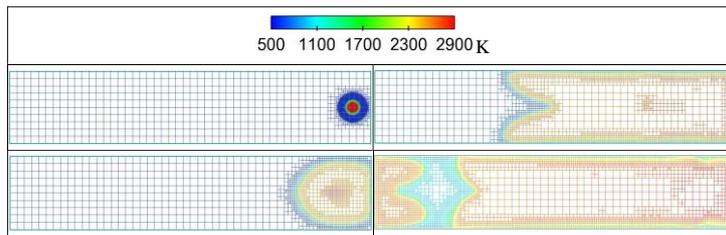


图 2-5 长方体燃烧弹长轴中间切面网格示意图

Fig.2-5 Grid schematic along the middle section of the long axis

本文使用初始气温表示发动机进气门关闭时刻气缸内的混合气温度，初始气温最低值设置为  $300 \text{ K}$ ，而当发动机运行一段时间后，再考虑到 EGR 的掺混，最终在关闭进气门的瞬间，混合气的最高温度会接近  $700 \text{ K}$ ，因此本文将初始气温设置在  $300 \text{ K} \sim 700 \text{ K}$  之间。

火花点火产生的火焰锋面在长方体定容燃烧弹长轴方向向前传播类似于活塞压缩过程，根据热力学估算，当初始压力为  $0.4 \text{ MPa}$ ，初始气温为  $700 \text{ K}$  时，燃烧终了的压力为  $1.2 \text{ MPa}$  左右，接近发动机压缩终了的压力，因此本文将初始压力设置在  $0.2 \text{ MPa} \sim 0.5 \text{ MPa}$  之间。

Nakagawa 等通过实验认为自然始于燃烧室壁面，因此末端壁面温度可能是影响爆震的参数之一<sup>[64]</sup>。壁面温度的设置参考了实际汽油机的燃烧室、活塞顶的壁面温度值，除末端壁面外，其他壁面温度设置固定在  $440 \text{ K}$ ，与正常燃烧时气缸壁面温度相当，如图 2-4。排气门在冷启动时的温度大约为  $300 \text{ K}$ ，其在运行一段时间后会接近  $700 \text{ K}$ ，因此本文将末端壁面温度设置在  $300 \text{ K} \sim 700 \text{ K}$  之间。

### 3. 爆震燃烧特性分析

#### 3.1 爆震评价指标

本文选用最大压力振幅作为评价爆震强弱的指标，把燃烧室内腔压力平均值称为平均压力，压力振幅定义为末端压力与平均压力之差的绝对值，最大压力振幅超过 0.02 MPa 即为爆震。

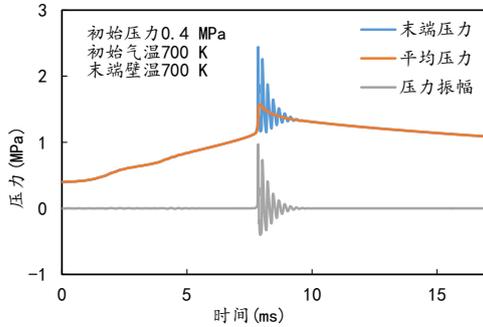


图 3-1 爆震工况压力曲线

Fig.3-1 Pressure curve of knocking

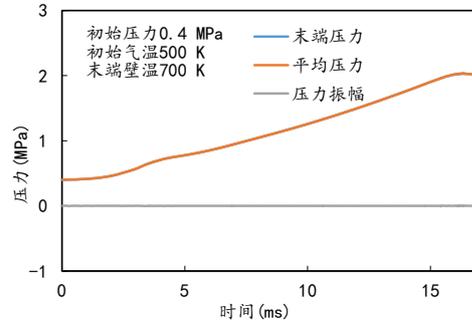


图 3-2 非爆震工况压力曲线

Fig.3-2 Pressure curve of non-knocking

发生爆震燃烧的平均压力、末端压力和压力振幅典型如图 3-1，其初始压力为 0.4 MPa、初始气温为 700 K、末端壁温为 700 K。燃烧了 7ms 左右发生爆震，末端压力突升，随后出现明显的压力振荡，接着压力振荡逐渐减小，然后末端压力缓慢地下降，完成完整的一个爆震燃烧过程。作为对比，图 3-2 为初始压力为 0.4 MPa、初始气温为 500 K、末端壁温为 700 K 工况下没有发生爆震的情况。

#### 3.2 初始压力对爆震燃烧特性的影响

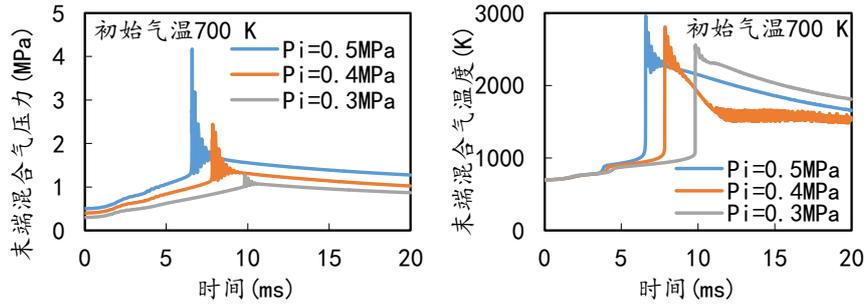
为探究初始压力对爆震燃烧特性的影响，本文将末端壁温固定为 700 K，分别在初始气温 550 K、600 K 和 700 K 选取初始压力 0.3 MPa、0.4 MPa 和 0.5 MPa 的工况点进行计算，初始参数如表 3-1。

表 3-1 初始压力和初始气温的变化范围

Table 3-1 Initial pressure and initial temperature variation

末端壁温(K)	初始气温(K)	初始压力(MPa)
700	700	0.3/0.4/0.5
700	600	0.3/0.4/0.5
700	550	0.3/0.4/0.5

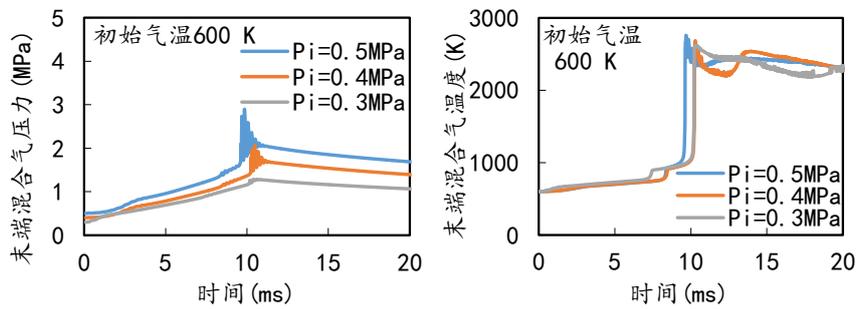
在初始气温 700 K 条件下初始压力对爆震压力波及末端气温的影响如图 3-3，随初始压力的增加，发生爆震的时刻明显提前，压力振幅明显增大，同样的规律适用于在初始气温为 600 K 和 550K 时。



a) 初始气温 700 K 条件下末端压力      b) 初始气温 700 K 条件下末端气温

图 3-3 初始气温 700 K 工况初始压力对爆震压力波及末端气温的影响

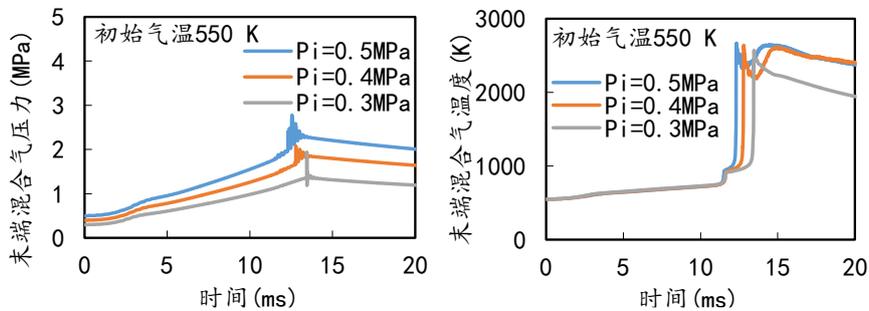
Fig.3-3 Effect of initial pressure on knocking in initial temperature 700 K



a) 初始气温 600 K 条件下末端压力      b) 初始气温 600 K 条件下末端气温

图 3-4 初始气温 600 K 工况初始压力对爆震燃烧影响

Fig.3-4 Effect of initial pressure on knocking in initial temperature 600 K



a) 初始气温 550 K 条件下末端压力      b) 初始气温 550 K 条件下末端气温

图 3-5 初始气温 550 K 工况初始压力对爆震燃烧影响

Fig.3-5 Effect of initial pressure on knocking in initial temperature 550 K

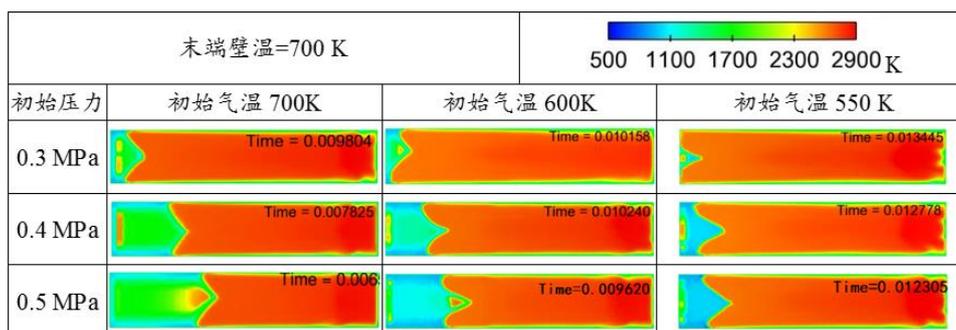


图 3-6 初始压力作单一变量时长方体定容燃烧弹内温度分布  
Fig.3-6 Temperature distributions of the rectangular combustion bomb

爆震时末端混合气自燃情况如图 3-6，时间的单位是毫秒。在同一初始气温下随着初始压力的提高，末端混合气发生自燃的时刻提前，末端混合气发生自燃时所引燃的未燃混合气越多。而在图 3-7 中可以看出在初始气温为 550 K 时初始压力提高时最大压力振幅反而程下降趋势，因此，将爆震燃烧产生的高效率等容燃烧使用在发动机上合理做功时应该考虑在初始压力较低的工况下，此时爆震所产生的压力波相对较小，既能利用爆震燃烧压力做功又能避免发动机受到压力波的破坏。

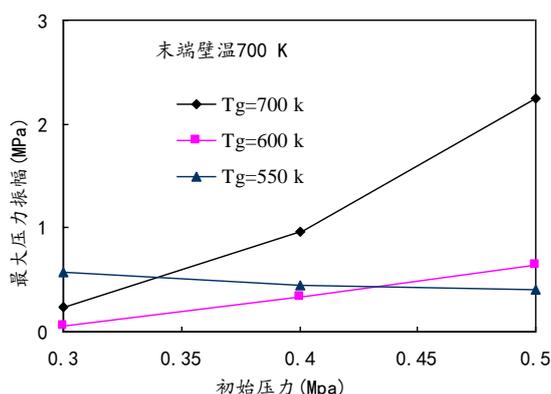


图 3-7 初始压力对爆震强度影响  
Fig.3-7 Effect of initial pressure on knocking intensity

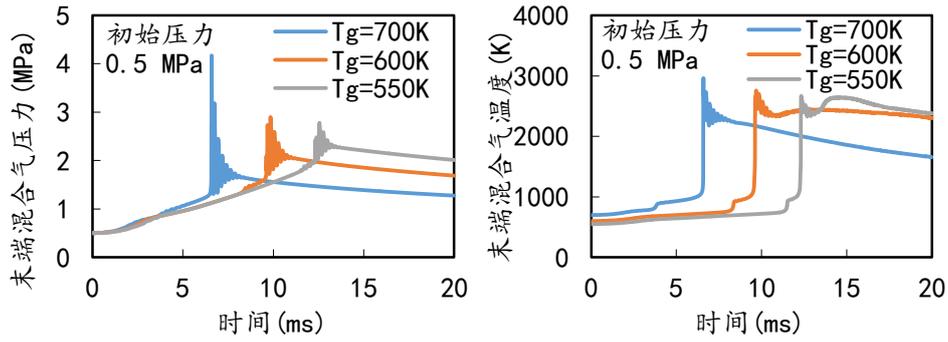
### 3.3 初始气温对爆震燃烧特性影响

为了探究初始气温对爆震燃烧特性的影响，本文将末端壁温设为 700 K，分别在三个压力下进行初始气温 550K、600K 和 700K 工况的计算，参数如表 3-2 所示。

表 3-2 初始气温和初始初始压力的变化范围  
Table 3-2 Initial temperature and initial pressure variation

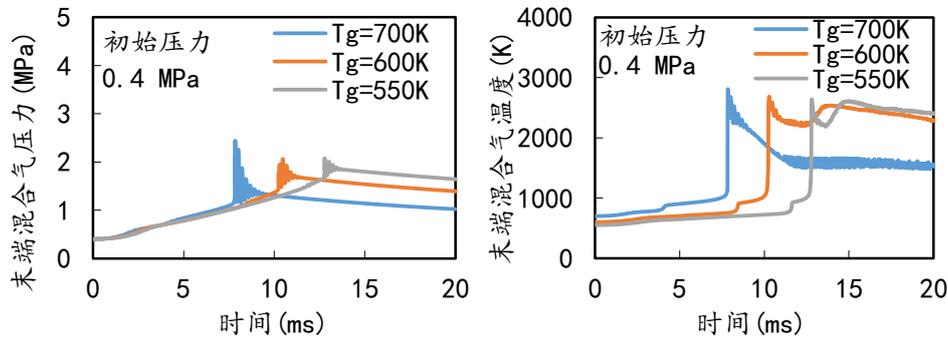
末端壁温 (K)	初始压力(MPa)	初始气温(K)
700	0.5	550/600/700
700	0.4	550/600/700
700	0.3	550/600/700

a 从图 3-8、3-9 可得随初始气温提高，爆震提前，压力振幅明显增大。图 3-10 中初始压力 0.3 MPa 时则无上述现象，压力振幅较小，因此利用爆震产生的压力波做功首先考虑在初始压力较小的工况。



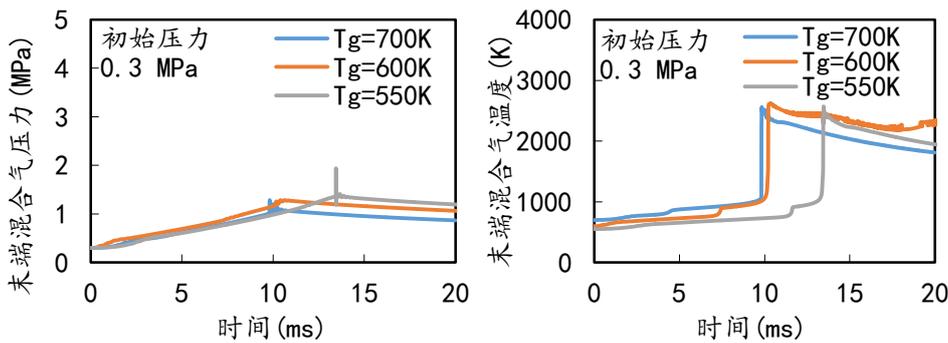
a) 初始压力 0.5 MPa 条件下末端压力 b) 初始压力 0.5 MPa 条件下末端气温  
图 3-8 初始压力 0.5 MPa 工况初始压力对爆震压力波及末端气温的影响

Fig.3-8 Effect of initial pressure on knocking in initial pressure 0.5 MPa



a) 初始压力 0.4 MPa 条件下末端压力 b) 初始压力 0.4 MPa 条件下末端气温  
图 3-9 初始压力 0.4 MPa 工况初始压力对爆震压力波及末端气温的影响

Fig.3-9 Effect of initial pressure on knocking in initial pressure 0.4 MPa



a) 初始压力 0.3 MPa 条件下末端压力 b) 初始压力 0.3 MPa 条件下末端气温  
图 3-10 初始压力 0.3 MPa 工况初始压力对爆震压力波及末端气温的影响

Fig.3-10 Effect of initial pressure on knocking in initial pressure 0.3 MPa

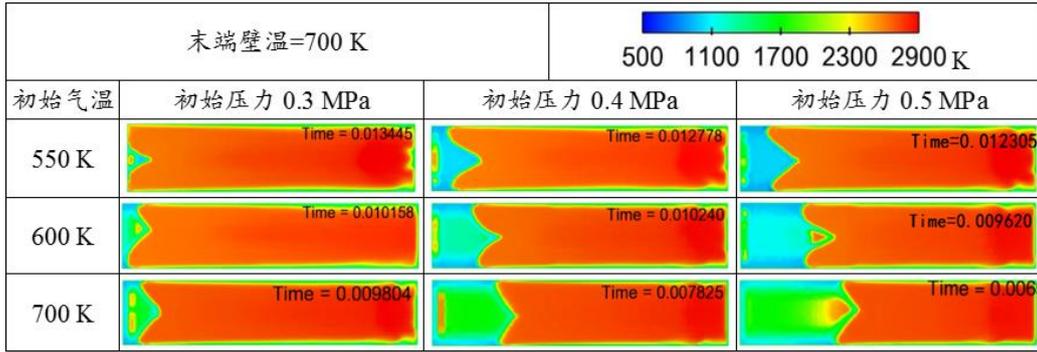


图 3-11 初始气温作单一变量时长方体定容燃烧弹内温度分布  
Fig.3-11 Temperature distributions of the rectangular combustion bomb

图 3-11 反应了在以初始气温作单一变量变化时爆震时刻末端混合气自燃的情况，在同一末端壁温和初始压力工况下，随着初始气温的提高，末端混合气发生自燃的时刻提前，发生自燃时存在的未燃混合气体积增大，爆震强度提高。

### 3.4 末端壁温对爆震燃烧特性影响

为了深入地探究末端壁温对爆震燃烧特性的影响规律，本文将初始压力固定为 0.4MPa，分别在初始气温 550K、600K 和 700K 下选取末端壁温 500K、600K、700K 和 1000K 的工况点进行计算。

从仿真模拟结果得出随末端壁温的提高，末端压力和末端气温的上升变化不大，压力、温度曲线非常接近，末端壁面温度的改变对压力和温度上升的时刻、速率影响均较小，仅是压力振幅不同。图 3-12 反应了末端壁温对爆震强度的影响，随着末端壁温的提高，最大压力振幅有下降的趋势。

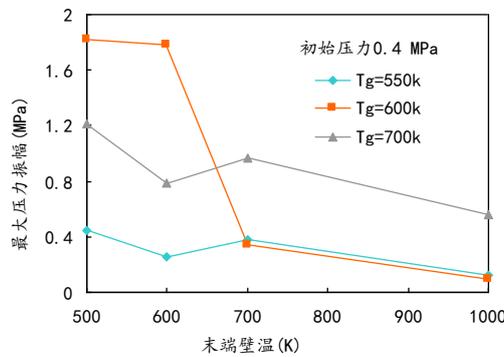


图 3-12 末端壁温对爆震强度影响  
Fig.3-12 Effect of end temperature on knocking intensity

图 3-13 反应了在末端壁温作单一变量变化时发生爆震时刻末端混合气自燃的情况，在同一初始压力和初始气温工况下随着末端壁温的提高，末端混合气发生自燃的时刻没有明显的变化，爆震时未燃混合气的体积相差不大。

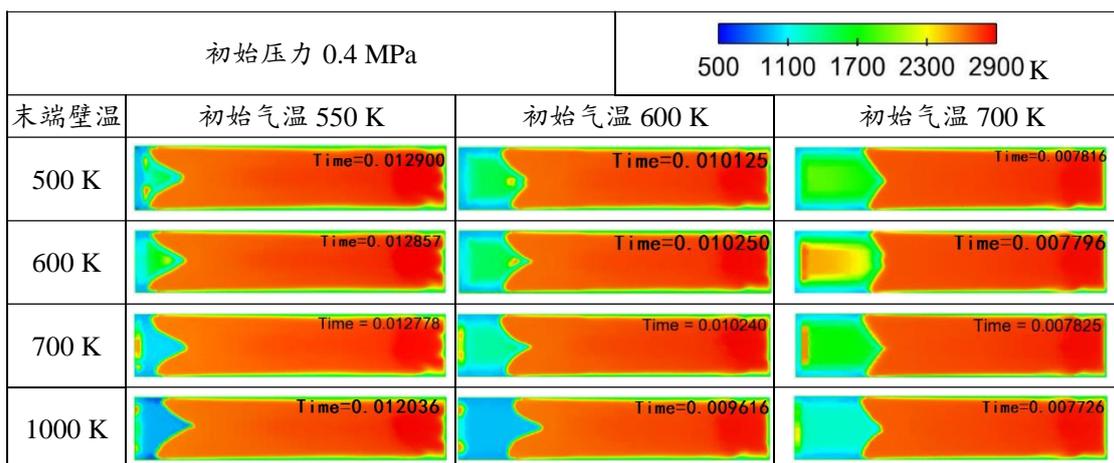


图 3-13 末端壁温作单一变量时长方体定容燃烧弹内温度分布  
Fig.3-13 Temperature distributions in the rectangular combustion bomb

## 4. 成果与结论

本文使用 IDAJ 公司的 Converge 软件建立了爆震燃烧数值仿真模型，该模型能够与具体实验结果有较好的一致性，并使用其进行了长方体燃烧弹内爆震燃烧的模拟，仿真了压力振荡的现象，并且研究确定了混合气初始压力、初始温度和末端壁温对爆震燃烧特性的影响。其中，与初始温度和压力相比，末端壁温对爆震燃烧影响不大；混合气初始压力和初始温度的影响较大。随着初始压力或初始温度的上升，发生爆震的时刻提前，发生爆震时刻末端未燃混合气增多，压力振幅增大，爆震强度增加。

姓名：周逸帆 电话：17321006009 单位：上海交通大学 邮箱：[515102228@qq.com](mailto:515102228@qq.com)

## 5. 参考文献

- [1] Eng J A. Characterization of pressure waves in HCCI combustion[R]. SAE Technical Paper, 2002.
- [2] 高青, 金英爱, 孙志军, 等. 点燃式发动机爆震测量及其强度分析[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(4): 335-338.
- [3] Cornetti G M, Arrigoni V, Sezzi F, et al. Measurement of the Extent of Abnormal Combustion by Means of an External Device[R]. SAE Technical Paper, 1973.
- [4] 梁毅, 张玉银, 李世琰, 徐斌. 基于化学反应动力学耦合 G 方程的定容弹爆震燃烧研究[J]. 车用发动机, 2016, 2: 17-22.
- [5] 高永兴. 双 VVT 高增压高压比直喷汽油机的抗爆震性能研究[D]. 上海交通大学, 2012.
- [6] 刘成材. 发动机爆震小波包变换分析及其特征提取研究[D]. 吉林大学, 2010.
- [7] 刘成材. 发动机爆震小波包变换分析及其特征提取研究[D]. 吉林大学, 2010.
- [8] Le Chatelier H. Recherches Experimentales et Theoriques sur la Combustion Des Melanges Gazeux Explosifs[M]. Paris:Dunod, 1883.
- [9] Ricardo H R. The High-Speed Internal-Combustion Engine[M]. London : Blackie ,1953
- [10] Withrow L, Rassweiler G M. Slow motion shows knocking and non-knocking explosions[R].

SAE Technical Paper, 1936.

- [11] Elbe G. Hydrocarbon Reactions and Knock in the internal combustion engine[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1937, 29(5): 551-554.
- [12] Affleck W S, Fish A. Knock: flame acceleration or spontaneous ignition?[J]. Combustion and Flame, 1968, 12(3): 243-252.
- [13] Elbe G. Hydrocarbon Reactions and Knock in the internal combustion engine[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1937, 29(5): 551-554.
- [14] Lewis B, Von Elbe G. Combustion, flames and explosions of gases[M]. Elsevier, 2012.
- [15] Schäpertöns H, Lee W. Multidimensional modelling of knocking combustion in SI engines[R]. SAE Technical Paper, 1985.
- [16] Halstead M P, Kirsch L J, Quinn C P. The autoignition of hydrocarbon fuels at high temperatures and pressures—fitting of a mathematical model[J]. Combustion and flame, 1977, 30: 45-60.
- [17] Cox R A, Cole J A. Chemical aspects of the autoignition of hydrocarbon air mixtures[J]. Combustion and Flame, 1985, 60(2): 109-123.
- [18] Griffiths J F. Reduced kinetic models and their application to practical combustion systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1995, 21(1): 25-107.
- [19] Hu H, Keck J. Autoignition of adiabatically compressed combustible gas mixtures[R]. SAE technical paper, 1987.
- [20] Tanaka S, Ayala F, Keck J C. A reduced chemical kinetic model for HCCI combustion of primary reference fuels in a rapid compression machine[J]. Combustion and flame, 2003, 133(4): 467-481.
- [21] Curran H J, Gaffuri P, Pitz W J, et al. A comprehensive modeling study of iso-octane oxidation[J]. Combustion and flame, 2002, 129(3): 253-280.
- [22] Ranzi E, Gaffuri P, Faravelli T, et al. A wide-range modeling study of n-heptane oxidation[J]. Combustion and Flame, 1995, 103(1): 91-106.
- [23] Ziegler I, Fournet R, Marquaire P M, et al. Detailed kinetic modeling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons formation in propane pyrolysis at high temperature/low pressure[C]//Proceedings of the European Combustion Meeting. 2005.
- [24] Wang Z, Wang Y, Reitz R D. Pressure oscillation and chemical kinetics coupling during knock processes in gasoline engine combustion[J]. Energy & fuels, 2012, 26(12): 7107-7119.
- [25] Han Z, Reitz R D. Turbulence Modeling of Internal Combustion Engines using RNG  $\kappa - \epsilon$  Models[J]. Combustion Science and Technology, 1995, 106(4-6): 267-295.
- [26] Han Z, Reitz R D. A Temperature Wall Function Formulation for Variable-density Turbulent Flows with Application to Engine Convective Heat Transfer Modeling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(3): 613-625.
- [27] Tinaut F V, Reyes M, Giménez B, et al. Measurements of OH\* and CH\* Chemiluminescence in Premixed Flames in a Constant Volume Combustion Bomb under Autoignition Conditions[J]. Energy & Fuels, 2010, 25(1): 119-129.
- [28] Yang X, Solomon A, Kuo T W. Ignition and combustion simulations of spray-guided SIDI engine using Arrhenius combustion with spark-energy deposition model[R]. USA: SAE International, 2012.