

## 利用 OH 发射谱进行的高温低浓度甲烷着火研究\*

马承飏, 林其钊

(中国科学技术大学 工程科学学院, 安徽 合肥 230027)

**摘要:**采用激波管进行低浓度甲烷和空气混合气的着火实验,通过测量压力和 OH 发射光谱,得到不同工况下的着火延迟,并与甲烷的详细反应机理计算结果作比较。结果表明:不同浓度下甲烷着火延迟的对数与温度倒数呈线性关系,着火延迟随甲烷浓度的降低而减少;贫燃条件下,采用详细动力学机理计算的表现活化能与实验数据拟合较好。

**关键词:**低浓度甲烷;着火延迟;激波管;OH 发射谱

**中图分类号:**TK16 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)06-197-06

## Research on methane ignition in lean-fuel and high temperature condition through OH emission measurements

MA Chengbiao, LIN Qizhao

(School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Ignition experiments of methane and air mixture in low equivalence ratio were carried out in a shock tube. Ignition delay in different working conditions was obtained through transient pressure signal and OH emission measurement. The experiment results were compared with the calculation based on detailed methane oxidation mechanism. Analysis results indicate that: there is a linear relationship between the logarithm of ignition delay and the reciprocal of temperature; ignition delay decreases with the reduction of methane concentration; the apparent activation energy of experiment results agrees well with the simulation of detailed mechanism.

**Key words:** lean-burn methane; ignition delay; shock tube; OH emission

在燃气轮机、瓦斯处理等应用领域,甲烷燃烧都在贫燃条件下进行,部分应用场合当量比可低至 0.1 以下<sup>[1]</sup>。研究低浓度下甲烷的着火特性对于完善其反应机理、指导燃烧反应器设计等方面具有重要意义,其中着火延迟时间是构建化学反应机理和验证其合理性的重要依据。激波管是研究着火延时的常用工具,其结构简单,可通过激波的压缩瞬间提高压力和温度,避免了常规加热、加压带来的非均匀性和滞后性,也排除了流场因素对实验精度的影响,在众多实验手段中较为稳定可靠,在各种类型燃料的着火延迟测量中应用广泛<sup>[2-4]</sup>。关于甲烷着火延迟的研究,以往的研究工作<sup>[5-10]</sup>实验数据涵盖的范围为:当量比 0.1~5、温度 880~2500 K、压力 100~3×10<sup>4</sup> kPa,其中绝大部分研究工作集中在当量比 0.5~2 附近,极端贫燃工况的实验数据极少。

### 1 实验方法

#### 1.1 实验设备

实验测试系统如图 1 所示。激波管横截面为 72 mm×72 mm 的矩形,实验段和驱动段长度分别为 1.8 m 和 3.0 m。实验段和驱动段之间依照实验的需要用不同规格的双向拉伸聚丙烯(Biaxially Oriented PolyPropylene, BOPP)膜隔开。由真空泵、气瓶和压力仪表调整初始的驱动段和实验段工况。

实验段布置了 4 个相互间距为 300 mm 的瞬态压力传感器,用于测量激波速度。实验过程中,被反射激波加热后的反应物的温度和压力是根据理想正激波关系式计算得到的,为达到实验所需的目标工况,控制的初始条件为实验段和驱动段的初始温度、压力、组分配比。实验段布置有大小

\* 收稿日期:2016-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51376171)

作者简介:马承飏(1985—),男,江西万载人,博士研究生,E-mail:macnbo@mail.ustc.edu.cn;

林其钊(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:qlin@ustc.edu.cn

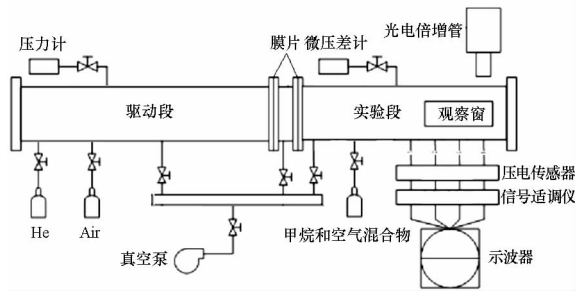


图 1 激波管实验平台系统

Fig. 1 Shock tube experiment system

为 150 mm × 60 mm 的光学石英玻璃观察窗用于光学测量。使用的测量设备及精度见表 1。

表 1 测量仪表

Tab. 1 Experimental measurements device

测量信号	测量仪表	精度
瞬态压力	PCB113A26	响应时间 < 1E - 6 s
实验段压力	U 型管水柱	10 Pa
高压段压力	水银计	100 Pa
压力和光电信号的时间差	示波器 TDS2004B	测量总时长/2500
气体初始温度	温度计	0.1 K

## 1.2 实验过程与测量方法

实验气体首先在容积较大的气瓶中按所需工况对应压比配气并静置 24 h 以上保证充分混合，之后用 U 型管微差压计控制进入实验段的气体量。驱动段以 He 和空气混合气作为驱动气体，当测量工况的着火延迟时间较长 (> 1 ms) 时，按缝合接触面工况进行配比，此时满足反射激波与波后气流接触面相遇后不发生二次激波或稀疏波反射的条件，可以获取尽可能长的有效测量时间。着火延迟时间短，不需要满足缝合接触面的实验工况则直接用纯 He 驱动以提高驱动能力。

实验开始前，实验段为低压甲烷和空气混合物(约为 2 kPa)，驱动段为高压驱动气体(约为 1.5 MPa)，中间段同样为驱动气但压力为驱动段的 1/2 左右，在中间段两侧用 BOPP 膜分别与驱动段和实验段隔开。实验开始时，采用真空泵对中间段抽真空，驱动段与中间段之间的 BOPP 膜先破裂，驱动段高压气体冲入中间段。依靠与实验段之间的压差，再使中间段和实验段之间的 BOPP 膜破裂，破膜后该压差产生入射激波，入射激波在实验段内传播后在端面反射再产生反射激波。实验段内的可燃混合气经过入射与反射激波的压缩，达到预定的温度压力工况(缝合接触面

时该工况可维持 3 ms 以上)，经过一定时间后发生着火。测量的着火延迟即为从反射激波到达测量位置至混合气发生着火中间所经历的时间。

选择研究的实验气体目标工况压力为 0.1 MPa 常压，温度范围为 1500 ~ 2000 K。为了使反射激波压缩后达到目标工况，实验段需要的初始压力非常低，容积也较小，故所充入实验气体量很少，同时气体进入实验段时压力读数又具有一定的滞后，实验过程中难以精确控制实验段的气体最终压力。为了解决这个问题，以微压差计的最终读数为准，调整驱动段压力优先满足目标工况温度，这主要是考虑到反应速率受温度的影响较大，优先关注的是温度和组分浓度对甲烷氧化过程的影响。

在实验段，采用压电传感器测量压力，使用光电倍增管及滤光片测量着火过程中的光强随时间的变化。在测量时光学窗口仅露出与最接近反射端面处的压电传感器同一位置的部分，其余位置全部遮挡住。这样所测光信号与压电传感器信号对应的是着火区域中的同一位置。光电倍增管上所采用的滤光片为 307 ± 15 nm 波段，对应的是自由基 OH 发射谱。

## 1.3 着火开始时反应区的工况确定

激波压缩后实验气体的状态依赖于入射及反射激波的强度，入射激波马赫数  $M_s$  和反射激波马赫数  $M_r$  之间的关系如下：

$$M_r^2 = \frac{2\gamma_2 M_s^2 - (\gamma_2 - 1)}{(\gamma_2 - 1)M_s^2 + 2} \quad (1)$$

式中， $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  为驱动段和实验段的气体绝热指数。反射激波到达后实验气体的温度  $T$  (即实验工况温度) 和初始状态温度  $T_0$  之间的关系为：

$$\frac{T}{T_0} = \frac{[2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)][(\gamma_1 - 1)M_s^2 + 2]}{(\gamma_1 + 1)^2 M_s^2} \times \frac{[2\gamma_2 M_r^2 - (\gamma_2 - 1)][(\gamma_2 - 1)M_r^2 + 2]}{(\gamma_2 + 1)^2 M_r^2} \quad (2)$$

由式(2)可知，工况温度  $T$  取决于初始温度  $T_0$  和入射激波马赫数  $M_s$ 。 $T_0$  由温度计直接测量得出，而  $M_s$  的测量可以通过记录各压电传感器激波到达时发生压力突变的时刻，进而计算得到。

式(1)和式(2)是在忽略了激波管内气体黏性和热交换的理想状态下推导得到的关系式。然而，实验发现，由于黏性边界层的存在，激波行进速度是衰减的，如以 1600 K 为目标工况的一次实验为例，按照邻近的两压电传感器信号压力突变时刻计算所得的入射激波马赫数分别为 3.346, 3.314, 3.242。实际进行着火延迟测量的位置十分贴近激

波的反射端面,且反射激波计算时对应的入射激波也应为反射端面处的实际值。因此,本文对所测入射激波到达时间数据对进行多项式拟合,以外推端面处的入射激波马赫数,对修正后的马赫数与直接采用最靠近端面处两传感器数据计算得到的结果进行比较,考虑了激波在运行方向上的衰减,更接近于真实情况。如上面列出的算例,可拟合得到端面处的入射激波马赫数为3.226。

实验中反射激波压缩后的压力工况存在一定的波动,范围在0.08~0.1 MPa之间。经数值模拟估算,在实验工况范围内的压力变化对着火延迟的影响很小,测得的着火延迟不确定性远远超出着火时压力略微偏离预期带来的偏差,因此为简便起见,直接认为压力均为0.09 MPa。

#### 1.4 着火延迟的测量

图2为混合气中甲烷的摩尔分数为5%时测量得到的一组压力与OH发射谱信号。压力信号在反射激波到达后迅速升高,经过一段时间后,甲烷着火,OH发射谱信号很快达到峰值,压力信号也随氧化反应的放热而再次升高,反应加速进行。

图3为混合气中甲烷的摩尔分数为0.5%时测量得到的一组压力与OH发射谱信号。此时属于极端贫燃条件,着火时的特征发生了明显变化。由于该当量比下甲烷和空气着火后的温升很小,压力信号的增长已经几乎无法分辨。图中的OH发射谱信号的测量值已经非常微弱,峰值信号是5%甲烷摩尔分数工况的1/20,信噪比大大降低,最大值仅比背景噪声高不一个数量级。这表明着火时的反应强度很低,反应放热不明显。OH发射谱几乎在反射激波到达时就开始增长,光谱信号花费了0.5 ms左右的时间才增长到峰值,相对于图2中5%甲烷摩尔分数工况来说时间更长。但是,摩尔分数0.5%的甲烷工况点火过程

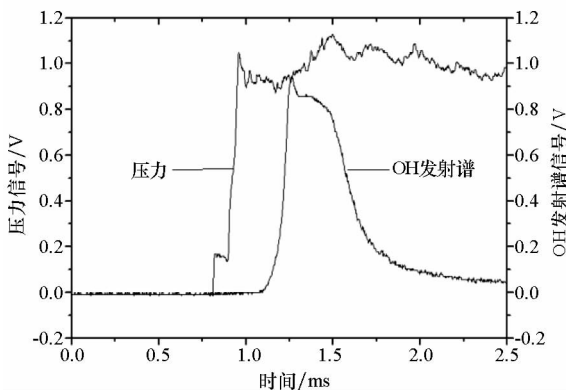


图2 甲烷的摩尔分数为5%时的压力和OH发射谱信号

Fig. 2 Pressure and OH signal of ignition when the methane concentration is 5%

中,OH强度增长斜率基本是一个常数,而图2的OH发射谱上升曲线斜率不断提高呈指数型反应加速。这表明在这一实验工况下,着火时反应启动得十分迅速,但受限于燃料的低浓度,氧化放热无法为反应过程的提速提供明显支持,OH的生成也无法如图2一样存在一个凸台,在较长时间内都维持较高水平。

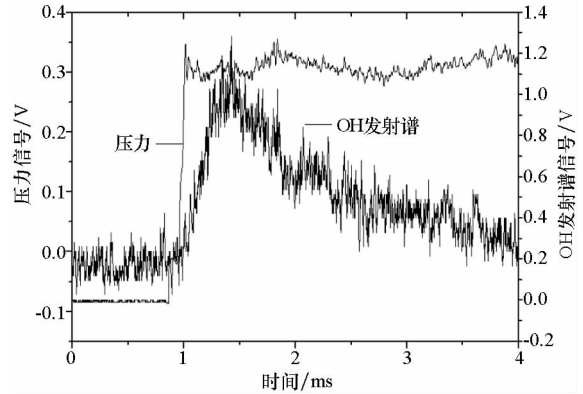


图3 甲烷的摩尔分数为0.5%时的压力和OH发射谱信号

Fig. 3 Pressure and OH signal of ignition when the methane concentration is 0.5%

着火延迟本身并没有统一的标准。前人的工作一般选择CH、OH等自由基的发射或者吸收光强信号作为着火标志,对于反应物放热充分、温度压力变化剧烈的工况,也可以选择压力信号作为着火标志。选定着火的标志信号后,具体的着火时刻也有不同的定义方法<sup>[10]</sup>,通常的有:①着火标志信号达到最大斜率<sup>[11]</sup>;②着火标志信号达到一定阈值,如信号达到最大值或最大值的10%、50%<sup>[12]</sup>,或者对着火时信号增长过程进行线性拟合,以其与初始没有着火时的信号曲线相交的时刻作为着火时刻<sup>[13]</sup>。同样的数据,采用不同标准定义的着火延迟得到的结果各不相同。将OH发射谱作为着火标志信号,在类似图2这样的甲烷浓度较高的工况下,无论采用上文哪种方式定义着火时刻,着火延迟都很容易确定,相互之间也不会有太大差别;但在类似图3这样的极端贫燃工况下,光谱信号信噪比不高,如果进行去噪声的平滑化处理,不同的滤波函数会带来不同的结果。因此,本文将反射激波到达测量位置(标准为压电信号达到最大值的1/2)到OH光谱信号达到峰值的时间间隔定义为着火延迟。

## 2 结果与分析

### 2.1 着火延迟的测量结果

不同工况下甲烷和空气混合物的着火延迟的实测结果如图4所示,由于处于贫燃工况,必须在

初始温度较高的条件下才能在短时间内发生着火,因此测量时的温度下限为 1400 K。甲烷和空气混合物的着火延迟随温度的升高和甲烷浓度的降低而缩短。

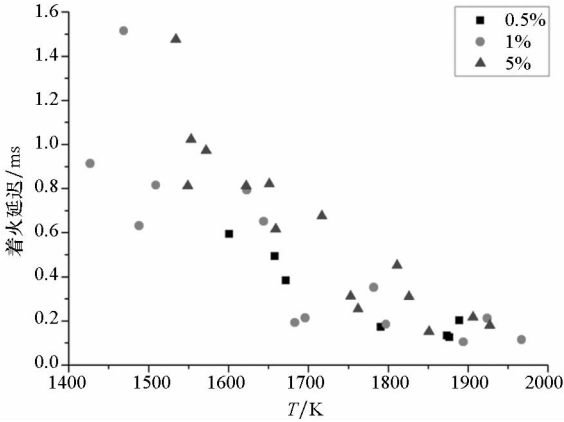


图 4 甲烷和空气混合物在不同甲烷浓度与温度下的着火延迟测量值

Fig. 4 Experimental results of ignition delay in different methane concentrations and temperature

对于这种混合气被压缩至高温后的着火,可分为强点燃工况和弱点燃工况<sup>[14-15]</sup>。强点燃工况通常发生在高温高压环境,整个反应区的混合气几乎同时发生着火,温度和压力发生阶梯状的上升。弱点燃工况与之相反,即使混合气的初始状态空间分布是均匀的,着火也不会同时发生,而是先在个别点出现孤立的火核,再向周边区域发展,借助火焰传播来引燃整个反应区域,因此这种着火模式不会观察到如同激波压缩效果一样接近 90° 的压力温度上升曲线。很显然,本实验的测量工况是典型的弱点燃工况,图 2 和图 3 中着火开始后并没有阶梯状的压力上升曲线。图 4 中着火延迟实验数据表现出的不确定性也源自于弱点燃的特征,着火启动时初始火核出现的位置、多少的不同将影响到火焰传播至整个反应区的时间。

由弱点燃的特点及实验控制和测量中的系统误差造成的着火延迟不确定性是客观存在的,但是在较广的工况范围内进行合理的统计拟合将有助于分析着火延迟的变化规律,尽可能减少个别数据不准确的影响。已有的工作已经证实着火延迟的变化规律可用阿累尼乌斯关系式表示。因此,对着火延迟求对数、对温度求倒数,就可以对实验数据进行线性拟合。

## 2.2 实验结果与详细机理模拟值的比较与讨论

### 2.2.1 数值模拟的模型与方法

通常认为激波管内是严格的一维流动,可忽略流体黏性力和边界层的影响,并假定过程是绝热的,

因此,可采用零维近似模型来描述激波压缩后的反应区状态。在本实验的工况范围内,在反射激波到达前,入射激波压缩后的反应区温度小于 600 K,远低于甲烷着火温度,入射激波与反射激波之间两次压缩的时间间隔为百微秒量级,在这样的时间尺度内可忽略入射激波压缩后到反射激波到达前混合气的燃烧放热效应。因此,可把实验段看成是一个绝热、无质量交换的等容系统,它的初始状态就是无化学反应条件下反射激波压缩后的温度和压力。

在实验段为绝热封闭定容系统的假设下,本文使用 Chemkin 4.1 中的 0 维定容均匀搅拌反应器 (Perfectly Stirred Reactor, PSR) 模型<sup>[16]</sup> 计算甲烷的氧化过程。甲烷氧化过程的化学反应速率和各组分的热力学参数采用 GRI-Mech 3.0 机理的数据<sup>[10]</sup>。该机理包含了几乎所有的甲烷燃烧过程中重要的中间组分和基元反应,其中各基元反应的反应速率表达式的相关参数是参考不同研究者的实验数据、针对甲烷氧化整体反应速率进行优化后的结果。计算时甲烷的着火时刻定义为 OH 生成速率达到最大值的时刻,与实验测量的着火时刻定义标准保持一致。

图 5 为在这一模型下,混合气工况为甲烷摩尔分数 5%、温度 1500 K 时,着火过程中温度与 OH 摩尔分数随时间的变化。可以看到 OH 生成最为迅速的时刻与温升速率最高的时刻几乎是重合的,这充分说明在着火过程中,OH 的生成与氧化反应放热非常同步,选择 OH 生成速率达到最大值的时刻为着火时刻是比较合理的。

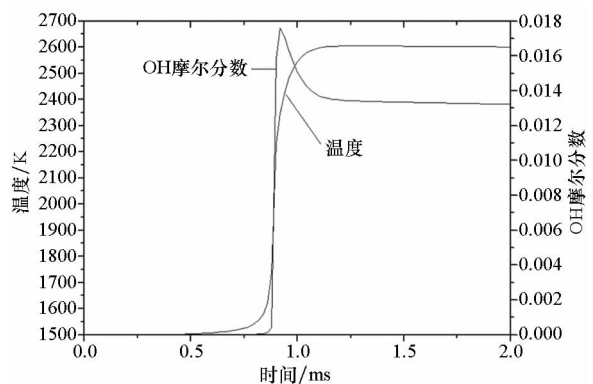


图 5 甲烷摩尔分数为 5%、初始温度 1500 K 时的温度与 OH 摩尔分数随时间的变化

Fig. 5 Temperature and OH mole fraction varied with time at initial temperature of 1500 K and methane concentration of 5%

### 2.2.2 实验结果与模拟值的比较和拟合

实验与计算得到的着火延迟对数随温度倒数的变化关系如图 6 ~ 8 所示。根据阿累尼乌斯关系式,着火延迟的对数  $\ln \tau$  和温度倒数  $10\,000/T$

呈线性关系(其中  $\tau$  的单位为 ms,  $T$  的单位为 K),从图中可以看出着火延迟用这样的线性拟合方式是可行的,这说明甲烷氧化的总包反应速率同样可以用阿累尼乌斯公式来描述。

在图 6 中,甲烷摩尔分数 5% 时用 GRI-Mech 3.0 详细反应机理计算的着火延迟普遍比实验测量值短,在其他几组数据中这一现象也普遍存在。模拟结果几乎完美地符合阿累尼乌斯关系式的规律,实验数据经处理后线性规律也比较明显,变化趋势与数值模拟结果是一致的。

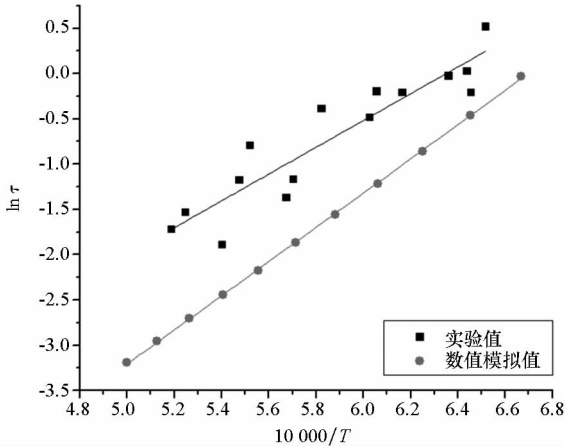


图 6 甲烷摩尔分数为 5% 时的着火延迟  
实验测量值与模拟值拟合

Fig. 6 Fitting of experimental and simulation ignition delay at methane concentration of 5%

图 7 中,甲烷摩尔分数为 1%,实验值比模拟值偏高的趋势依然存在,实验数据拟合后的着火延迟在低温区与模拟值的相对偏差远远小于高温区,这是因为实际上高温区的着火延迟时间非常短,到 1900 K 时模拟结果低于 0.1 ms,因此 0.1 ms 左右的

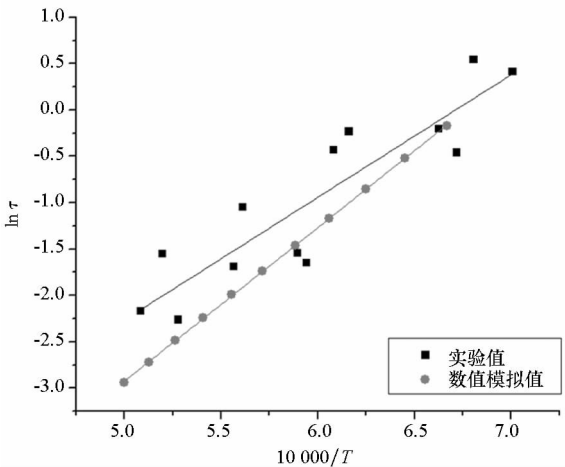


图 7 甲烷摩尔分数为 1% 时的着火延迟实验  
测量值与模拟值拟合

Fig. 7 Fitting of experimental and simulation ignition delay at methane concentration of 1%

差距就会造成明显的相对偏差。然而,实际上各组不同浓度比例的混合气的着火延迟在高温实验工况的实验值与模拟值绝对差距都比低温工况小。

此外,甲烷摩尔分数 1% 的混合气在相近的温度区间着火延迟的波动幅度也高于甲烷摩尔分数为 5% 时的数据,拟合方差较大,而由于拟合后低温区间着火延迟的实验值与模拟值相对差距不大,所以出现了部分比模拟结果更小的实验测量值。

图 8 中,甲烷摩尔分数为 0.5%,这种工况接近测量极限,混合气难以着火。着火后测量的 OH 发射谱不仅存在如图 3 所示的大量噪声,而且有时会由于峰值不明显难以确定准确的着火延迟时间。因此,这个浓度工况下获取可靠的实验数据比较困难,数据量要比前几组浓度工况明显减少,没有取得温度在 1600 K 以下时的着火延迟数据。在这一浓度工况下实验测量值同样高于模拟值,但是差距不明显,实验值与模拟值的线性拟合斜率也非常接近。

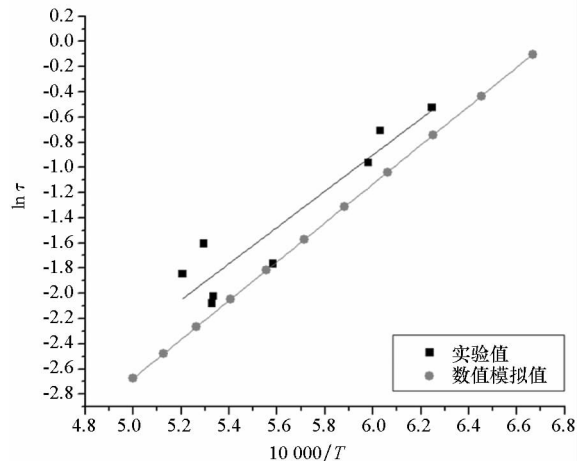


图 8 甲烷摩尔分数为 0.5% 时的着火延迟实验  
测量值与模拟值拟合

Fig. 8 Fitting of experimental and simulation ignition delay at methane concentration of 0.5%

综上,几乎所有的实验测量得到的着火延迟都高于数值模拟值,这一点可以归结为在已选取的着火延迟标准下数值模拟模型与实际实验过程间的系统偏差。在模拟时,仅仅考虑了化学反应因素,认为达到着火条件时整个混合气都会同步地进行反应,这种理想化的假设与实际着火过程存在不同。此外,模拟时使用的是定容模型,尽管测量时间极短,但着火时的压力上升不可避免地会使混合气略有膨胀。高浓度下由于压力升高幅度更大,这一效应会更强一些,因此甲烷摩尔分数 5% 的工况,实验值与数值模拟之间的偏差要高于其余两个工况。

在同为甲烷摩尔分数 5% 工况下,图 2 中实验测量的 OH 发射谱从开始生成到到达峰值有一个过程(图中约为 0.3 ms),而如图 5 所示在数值模拟的预测中,这一过程所消耗的时间是比实验测量值短的(约为 0.1 ms)。图 6 中,着火延迟实验数据普遍比详细机理计算值高 0.1 ms ~ 0.2 ms。实验测量中选择 OH 发射谱峰值作为着火时刻,在弱点燃工况下这意味着包含了火焰传播的时间,直到火核发展到整个反应区时才判断为着火。选择其他标准作为着火开始的标志会有助于减少这一影响,如在 1.4 小节中提到过的最后一种数据处理方法——选择信号增长曲线的最大斜率位置作辅助线,与着火前基线相交的时刻作为着火起始点,以往的研究者在信号增长曲线斜率不够高的弱点燃工况着火延迟测量时就常采用这种方法,但是,由于极端贫燃条件下 OH 发射谱强度低和噪声高,数据处理变得十分困难,前面提到的这种数据处理方式在甲烷摩尔分数 0.5% 时甚至有可能使判定的着火时刻在反射激波到达之前,这显然是不能接受的,因此这种方法在本文没有被采用。

着火延迟随温度和组分比例的变化规律是不会随测量和数据处理标准变化的,这方面实验与数值模拟的结果表现一致。图中拟合直线的斜率表征了着火延迟对温度的敏感性,与总包反应的表观活化能成正比。详细反应机理的模拟结果认为,随着甲烷浓度的降低,温度对着火延迟的影响也会降低,实验结果支持了这一结论,低浓度甲烷由着火延迟推算的表观活化能与详细机理的计算值相互之间吻合较好。浓度越低,总包反应的表观活化能也越低。

### 3 结论

实验表明,低浓度甲烷的着火特征是反应链启动快但发展慢,在定义 OH 生成速率峰值作为着火时刻的条件下,相同温度时,着火延迟时间随甲烷浓度降低而减少,同时温度对着火延迟的影响远大于甲烷浓度的影响,随着温度的提高,点火延迟时间迅速缩短。

实验结果和使用 GRI-Mech 3.0 详细反应机理的数值模拟都表明,各浓度工况下着火延迟时间的对数与温度倒数符合线性关系,可以用阿累尼乌斯关系式描述。在所研究的温度与浓度范围内,贫燃甲烷氧化时的表观活化能与详细机理计算值较为吻合。

### 参考文献 (References)

[1] Li Y J, Xia Y. DES/CCHP: the best utilization mode of natural gas for China's low carbon economy [J]. Energy

Policy, 2013, 53: 477 - 483.

[2] Man X J, Tang C L, Wei L J, et al. Measurements and kinetic study on ignition delay times of propane/hydrogen in argon diluted oxygen [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(5): 2523 - 2530.

[3] 张英佳, 黄佐华, 王金华, 等. 激波管研究煤油/空气混合气的自着火特性 [J]. 科学通报, 2011(1): 88 - 96. ZHANG Yingjia, HUANG Zuohua, WANG Jinhua, et al. Shock tube study on auto-ignition characteristics of kerosene/air mixtures [J]. Chinese Science Bulletin, 2011(1): 88 - 96. (in Chinese)

[4] 谢伟, 李萍, 张昌华, 等. 利用 OH 自由基特征发射谱测量正庚烷的点火延迟时间 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 488 - 491. XIE Wei, LI Ping, ZHANG Changhua, et al. Measurements of the ignition delay times of n-Heptane by using characteristic emission from OH radical [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2): 488 - 491. (in Chinese)

[5] Lifshitz A, Scheller K, Burcat A, et al. Shock-tube investigation of ignition in methane-oxygen-argon mixtures [J]. Combustion and Flame, 1971, 16(3): 311 - 321.

[6] Krishnan K S, Ravikumar R, Bhaskaran K A, et al. Experimental and analytical studies on the ignition of methane-acetylene mixtures [J]. Combustion & Flame, 1983, 49(1/2/3): 41 - 50.

[7] Spadaccini L J, Colket M B. Ignition delay characteristics of methane fuels [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1994, 20(5): 431 - 460.

[8] Petersen E L, Davidson D F, Hanson R K. Kinetics modeling of shock-induced ignition in low-dilution CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> mixtures at high pressures and intermediate temperatures [J]. Combustion & Flame, 1999, 117(1/2): 272 - 290.

[9] Levy Y, Olchanski E, Sherbaum V, et al. Shock-tube ignition study of methane in air and recirculating gases mixture [J]. Journal of Propulsion, 2015, 22(3): 669 - 676.

[10] Frenklach M, Wang H, Goldenberg M, et al. GRI-MECH: an optimized detailed chemical reaction mechanism for methane combustion; PB - 96 - 137054/XAB [R]. SRI International, CA, USA, 1995.

[11] Herzler J, Naumann C. Shock-tube study of the ignition of methane/ethane/hydrogen mixtures with hydrogen contents from 0% to 100% at different pressures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 213 - 220.

[12] Chaumeixa N, Pichona S, Lafosse F, et al. Role of chemical kinetics on the detonation properties of hydrogen/natural gas/air mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2216 - 2226.

[13] Donoho N, Heufer A, Metcalfe W A, et al. Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures [J]. Combustion & Flame, 2014, 161(6): 1432 - 1443.

[14] Oran E S, Gamezo V N. Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion [J]. Combustion & Flame, 2007, 148(1): 4 - 47.

[15] 王高峰, 林其钊, 马承斌, 等. 电热破膜激波管及其 PLIF 测量系统的研制 [J]. 实验流体力学, 2009, 23(1): 65 - 69. WANG Gaofeng, LIN Qizhao, MA Chengbiao, et al. Development of an electro-heating diaphragm rupture structure and PLIF measurement system for a shock tube [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(1): 65 - 69. (in Chinese)

[16] Glarborg P, Kee R J, Grcar J F, et al. PSR: a Fortran program for modeling well-stirred reactors; SAND - 86 - 82090N; DE86007836 [R]. USA: Sandia National Labs, 1986.