文章编号：1001-1455(2014)05-0580-06 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)05-0580-06

氢气定容燃烧的实验研究*

暴秀超[1]，刘福水[2]，陈 超[1]
(1. 西华大学交通与汽车工程学院，四川 成都 610039；
2. 北京理工大学机械与车辆工程学院，北京 100081)

摘要：利用定容燃烧弹和高速数据采集系统对氢气定容燃烧进行实验研究，得出氢气定容燃烧压力变化过程、燃烧爆压及爆炸常数的变化规律。研究结果表明：中心点火定容燃烧的压力变化过程为：从开始的火花跳火干扰到平稳的等压燃烧，再到压力的慢速和快速增加，在燃烧的中后期会出现压力振荡；在非燃烧极限工况下，随着燃空当量比的增加燃烧爆压先增加后减小，随着初始压力的升高燃烧爆压几乎线性增加，随着温度的增加燃烧爆压和最大燃烧爆压都减小；随着燃空当量比的增加爆炸常数先增加后减小，在燃空当量比小于 4.0 的工况，燃烧爆炸常数随初始压力的升高而增加，而燃空当量比大于 4.0 的工况随着初始压力的升高而下降；在燃空当量比小于 2.5 时，燃烧爆炸常数随温度升高而减小，在燃空当量比大于 2.5 时，则正好相反。

关键词：爆炸力学；爆炸常数；定容燃烧；氢气；爆压
中图分类号：O381 **国标学科代码**：1303510 **文献标志码**：A

氢气作为 21 世纪理想的替代能源，在工业发展中起着越来越重要的作用。但由于氢气点火能量低、燃烧速度快、着火范围广等特性，很容易在运输和存储的过程中被引燃，也就是发生定容燃烧(定容爆炸)，这是制约氢气利用的一个很严重的安全隐患[1-2]。此外，对于氢气内燃机而言，氢气定容燃烧特性是氢内燃机设计和性能预测的基础，因此，研究氢气定容燃烧非常必要。国内外研究者对此也做过一定的研究，但他们主要的研究内容是常温常压下不同浓度氢气燃烧极限及燃烧爆压，而对于较高温度、较高压力、大范围燃空当量比(燃烧前氢气的配比)下的氢气定容燃烧特性数据不足，燃烧过程的整体分析还处于空白[3-5]。本文中拟在大范围调节初始压力、初始温度、燃空当量比的条件下，分析氢气定容燃烧时的压力变化过程，揭示爆压及爆炸常数的变化规律。

1 实验设备

实验设备由球形定容燃烧弹、纹影光路系统、配气系统、点火系统、数据采集系统和高速摄像系统等 6 个部分组成，如图 1 所示。其中球形定容燃烧弹的内径为 400 mm，在相对应的两侧安装有直径 100 mm 的精加工的光学石英玻璃，为纹影法提供必要的光学通道，其通道直径为76 mm，燃烧弹内布置中心电极由点火系统来点燃可燃气。纹影光路系统布置成 Z

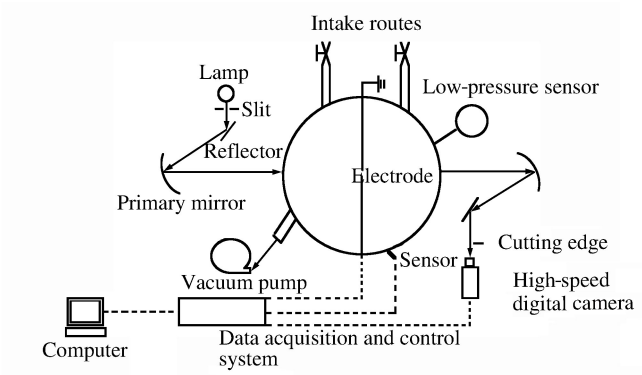

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

* **收稿日期**：2013-04-17；**修回日期**：2013-09-23
基金项目：流体及动力机械教育部重点实验室基金项目(SBZDPY-11-20)；
四川省教育厅自然科学重点项目(11ZA283)；西华大学重点项目(Z1120318)；
西华大学研究生创新基金项目(YCJJ2014093)
作者简介：暴秀超(1981—)，女，博士，讲师。

形，2 个主反射镜直径为 100 mm，焦距为 100 cm。利用低压传感器来较精确的测量配气分压，其量程可调，精度达 100 Pa。高速摄像机为 TRI 公司的 Phantom v7.3，拍摄速度最高为2×10^5 s^{-1}。压力数据采集使用 Kistler 公司的石英压电传感器和 NI 公司的 PCI-6133 数据采集卡。

2　压力变化过程

火焰在定容燃烧时，如果假设系统绝热，火焰燃烧时的压力升高比即为燃烧质量比。因此，压力数据可以一定程度上反映燃烧的过程。理论上，在气体绝热定容燃烧过程中随着燃烧的不断进行压力也不断稳步升高，而当燃烧结束时压力将保持不变[6]。在实际的定容燃烧系统中传热是不能避免的，在火焰没有到达壁面以前，传热过程都是从未燃气传向壁面，因此传热量很小，且由于未燃区的温度随着燃烧的进行不断的升高使得传热量也相应有所增加，当火焰到达壁面后已燃气直接向壁面传热，由于已燃气温度高，所以传热量较大。

实际定容燃烧的压力变化过程如图 2 所示，图中显示了初始温度为 300 K、初始压力为 0.3 MPa、燃空当量比为 0.6 工况下氢气定容燃烧过程的压力曲线。变化过程可总体概括为：压力先保持不变，而后不断增加，在达到峰值前后压力升高量较小，最后压力较线性的降低，并且在压力升高的中后期出现压力波动。结合燃烧过程对此燃烧压力曲线分析得：火花跳火后可燃混合气开始燃烧，由于点火击穿电压较高对压力信号会有短暂的干扰；在火焰燃烧初期（图上时间轴 0～6 ms 对应的压力线），燃烧锋面从点燃源不断的向外增大，并且边燃烧边膨胀，但由于此时已燃混合气占总气体的比例很小使得未燃气体被压缩量几乎可以忽略不计，压力也几乎不变，因此可以看作等压燃烧阶段；随后，压力不断增加（图上时间轴 6～25 ms 对应的压力线），火焰也是边燃烧边膨胀，但由于已燃气体占总体积的比重加大，使得未燃气体在燃烧前被压缩，即未燃气体的压力和温度得到了增加，此外还可以很明显的看出此压力线大约在 19 ms 时刻不再光滑而是出现了高频振荡，且随着燃烧的进行有振幅加强的趋势；而后，压力曲线经历了峰值附近变动较小阶段，此时火焰的膨胀速度很小，在燃烧完成时膨胀速度降为零，如果不考虑传热，压力的峰值点便为燃烧的终止点。但由于火焰不稳定的影响，火焰锋面不能同时到达壁面，使得最后的火焰燃烧面积越来越小，再加上此时的传热量很大，所以通常会使得燃烧终点在压力峰值点之后；最后，在燃烧完以后，压力曲线出现了线性的降低阶段（图上时间轴大约 37ms 以后对应的压力线），这是由于已燃气的向外传热而使自身受到冷却引起的。

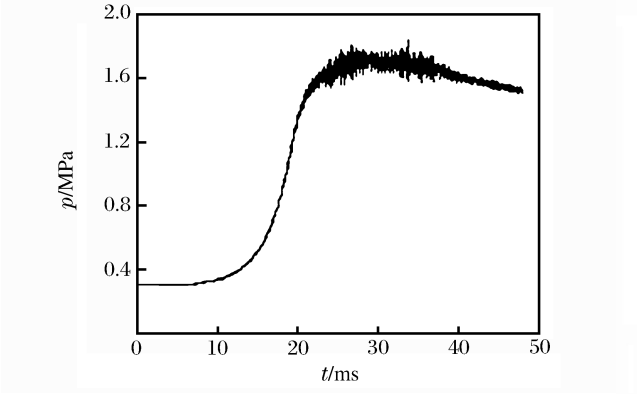

图 2　氢气定容燃烧时燃烧压力随时间的变化

Fig. 2　Combustion pressure varied with time under constant volume of hydrogen

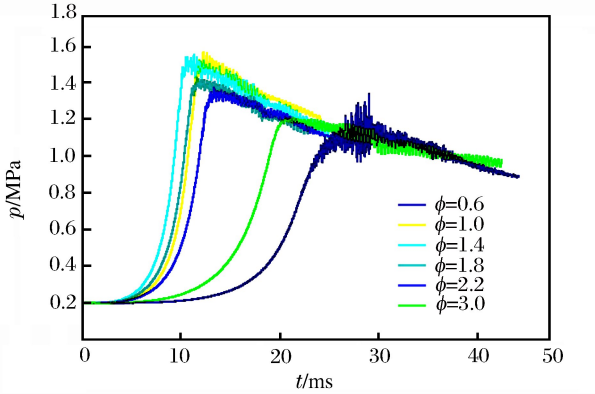

图 3　不同体积分数的氢气燃烧压力随时间的变化

Fig. 3　Combustion pressure varied with time under different volume fractions

图 3 显示了初始温度为 300 K、初始压力为 0.2 MPa 工况下不同体积分数氢气燃烧的压力曲线。由于体积分数的不同，相应的火焰燃烧速度有很大不同，反应在压力曲线上表现为燃烧持续时间（忽略传热，燃烧持续时间为从燃烧开始到升高到压力最大值的过程）的不同，但发展趋势是较一致的，都是从开始的火花跳火干扰到平稳的等压燃烧，再到压力的慢速和快速增加，在燃烧的中后期会出现压力振

荡,最终达到完全燃烧,因此也可以称为中心点火定容燃烧的压力变化过程,在不同工况压力振荡的起始点相对于其本身的燃烧阶段有所差异。

3 爆压变化规律

燃烧爆压是指在燃烧过程中压力达到的最大压力值,图 4 所示为燃烧爆压随燃空当量比 ϕ 的变化曲线。在非燃烧极限工况下,随着燃空当量比的增加燃烧爆压先增加后减小,常温常压下最大燃烧爆压

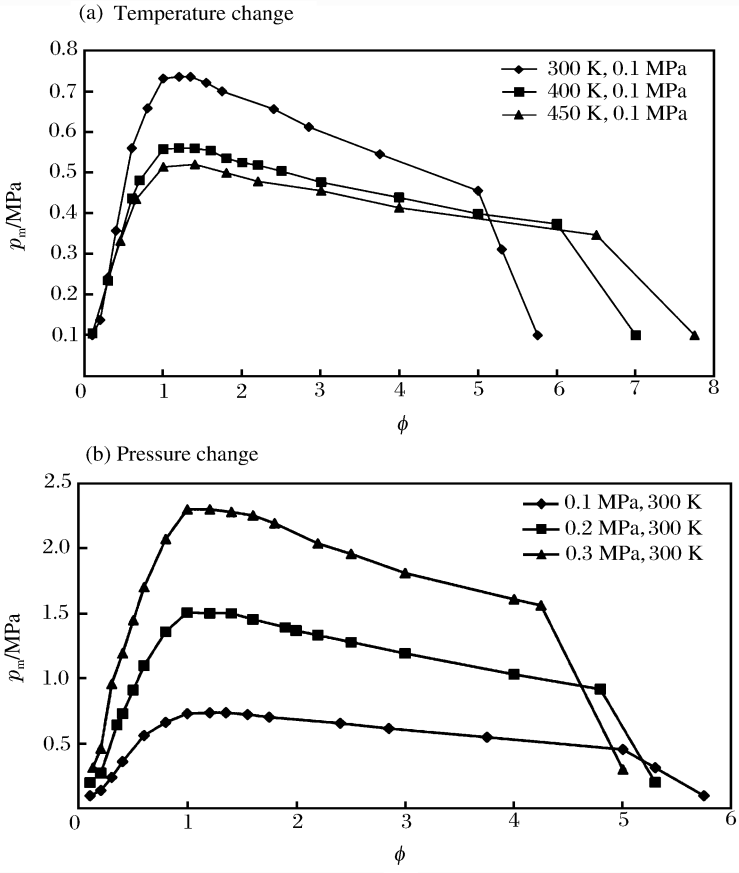

图 4 燃烧爆压随燃空当量比的变化曲线

Fig. 4 Combution-explosion pressure varied with equivalence ratio

约为 0.74 MPa,出现在约为理论燃空当量比的工况下,且不随初始压力温度的变化而变化。这是因为在相同初始压力和温度情况下只有在理论燃空当量比时可燃的氢气量最大。随着温度的增加燃烧爆压和最大燃烧爆压都减小,这同样也可以从燃烧氢气量上来解释,对于压力和体积相同的可燃气,温度越高气体质量越少,燃烧放出的热量也就越少,所以燃烧爆压也就越低。随着压力的增加燃烧爆压随之增加,且随着初始压力的升高燃烧爆压几乎线性增加,这主要还是因为初始温度不变的情况下可燃氢气量随着压力的增加线性增加。

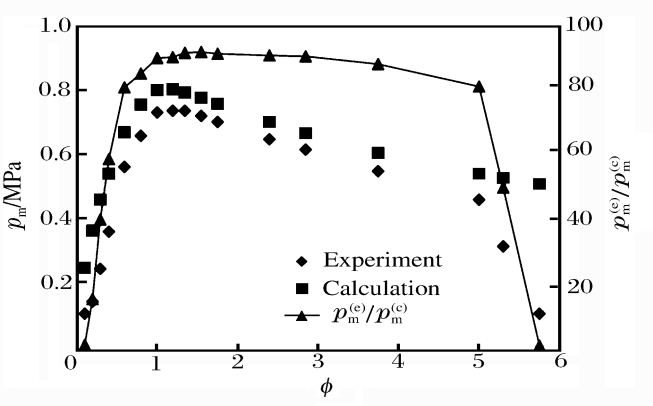

图 5 实验值与计算值对比

Fig. 5 Comparison of combution-explosion pressure between experiment and calculation

图 5 所示为初始温度为 300 K、初始压力 0.1 MPa 下燃烧爆压的实验值与绝热化学平衡法计算值的对比，在燃空当量比为 0.8～4.0 之间两者的比值为约 90%，最大值出现在燃空当量比为约 1.4，这说明此燃空当量比下燃烧与放热的损失（燃料的不完全燃烧与传热的和）相对于理论燃烧放热总量较小；反之，在实验值与计算值的比值较小时，说明对应工况的燃烧与放热损失相对于总放热量较大。

4　爆炸常数变化规律

燃烧爆炸常数 K 定义为压力上升速率与燃烧容积立方根的乘积，所以燃烧爆炸常数与压力上升速率的变化规律一致，只是数值上相差固定的倍数而已，因此可以用爆炸常数来反应压力上升的变化规律。图 6为燃烧爆炸常数的变化曲线。

随着燃空当量比的增加，燃烧爆炸常数（压力上升速率）先增加后减小，最大燃烧爆炸常数（最大压力上升速率）出现在燃空当量比约为 1.4 的工况下，几乎不随初始压力和温度的变化而变化。这是因为在只改变体积分数的情况下，压力上升速率主要由火焰速度和可燃氢气密度决定。文献[7]已经介绍过氢气的最大层流火焰速度出现在燃空当量比约为 1.7 左右，但由于火焰在燃烧过程中达到胞状不稳定以后火焰将出现不断的自加速，且在本文中定容燃烧爆炸特性实验所测工况内随着燃空当量比的减小加速作用增强，所以最大火焰速度对应的燃空当量比要较 1.7 小。另外，可燃的氢气密度（单位体积内可燃的氢气质量）也对压力上升速率有影响，可燃的氢气密度加大会使得燃烧爆炸常数（压力上升速率）有所增加，在理论燃空当量比附近可燃的氢气密度最大，所以最大燃烧爆炸常数会出现在比火焰速度最大工况稍偏向理论燃空当量比的时候，所以最终表现为最大燃烧爆炸常数（最大压力上升速率）出现在燃空当量比为 1.4 的工况下。

随着温度的增加可燃氢气密度线性下降，火焰速度随温度的升高而升高，两者共同作用的结果为：在燃空当量比小于 2.5 时，燃烧爆炸常数（压力上升速率）随温度升高而减小，即火焰速度的升高作用不足以抵消可燃氢气密度的下降作用；在燃空当量比大于 2.5 时，则正好相反，表现为燃烧爆炸常数（压力上升速率）随着温度的升高而增加，即火焰速度的升高作用大于可燃氢气密度下降的作用。

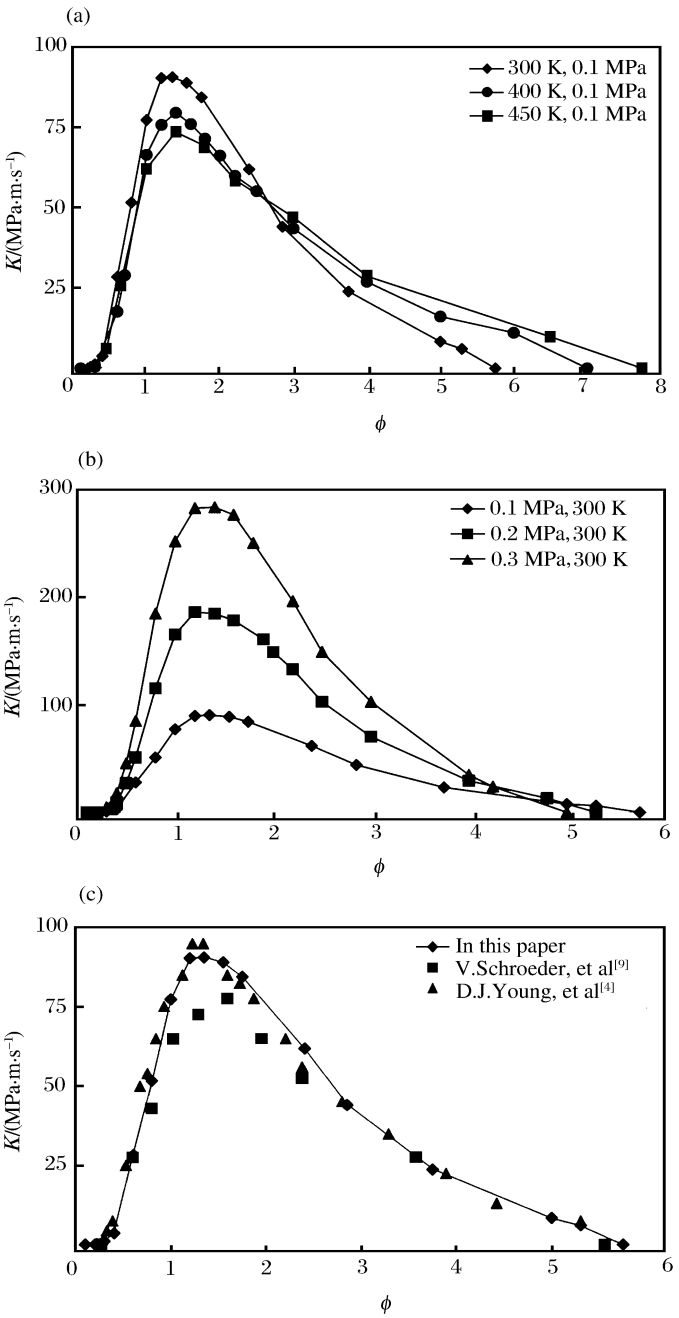

图 6　爆炸常数随燃空当量比的变化曲线

Fig. 6　Explosion constant varied with equivalence ratio

火焰速度随压力的变化比较复杂。在实验所测范围内,文献[7]得出氢气的层流燃烧速度在燃空当量比介于 1.2～2.2 之间时随着压力的增大而增大,其它工况随着压力的增大而减小。文献[8]中得出随着压力的增加火焰自加速特性增强。因此,综合两因素的影响可得:火焰速度随着初始压力的增加而增加的燃空当量比范围大于 1.2～2.2。再加上随着压力的升高可燃氢气密度线性增加,使得燃烧爆炸常数(压力上升速率)随初始压力增加而增加的范围大大超于火焰速度如此变化的范围,最终表现为约在燃空当量比小于 4.0 各工况的燃烧爆炸常数(压力上升速率)随初始压力的升高而增加,而燃空当量比大于 4.0 的工况随着初始压力的升高而有所下降。

将常温常压下燃烧爆炸常数的实验结果与 D. J. Young 等[4]、V. Schroeder 等[9]的研究结果进行对比对比,如图 6(c)所示,在较低和较高体积分数时三者的结果一致,在中等浓度时本文的实验结果与 D. J. Young等[4]的较一致,只是在最大燃烧爆炸常数值上有稍稍的不同,本实验测得的最大燃烧爆炸常数约为 91 MPa·m/s,对应的燃空当量比约为 1.4。V. Schroeder 等[9]的测量值在中等燃空当量比时偏低,对应的燃空当量比也偏大。

5 结 论

通过定容燃烧弹和高速数据采集系统,研究了氢气定容燃烧时的压力变化过程,可弥补氢气定容燃烧过程整体分析的空白;揭示了爆压及爆炸常数的变化规律,为更好利用氢能提供一定的依据及基础数据。其得出的主要结论如下:

(1)中心点火定容燃烧的压力变化过程为:从开始的火花跳火干扰到平稳的等压燃烧,再到压力的慢速和快速增加,在燃烧的中后期会出现压力振荡;

(2)在非燃烧极限工况下,随着燃空当量比的增加氢气的燃烧爆压及爆炸常数都是先增加后减小;

(3)随着初始压力的升高氢气燃烧爆压几乎线性增加;爆炸常数在燃空当量比小于 4.0 时随初始压力的升高而增加,而燃空当量比大于 4.0 时随着初始压力的升高而有所下降;

(4)随着温度的增加氢气燃烧爆压和最大燃烧爆压都减小;在燃空当量比小于 2.5 时,燃烧爆炸常数随温度升高而减小,在燃空当量比大于 2.5 时,则正好相反。

参考文献:

[1] Crowl D A, Jo Y D. The Hazards and Risks of Hydrogen[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007,20(2):158-167.

[2] Sato Y, Iwabuchi H, Groethe M, et al. Experiments on Hydrogen Deflagration[J]. Journal of Power Sources, 2006,159(1):144-148.

[3] Tanaka T, Azuma T, Evans J A, et al. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007,32(13):2162-2170.

[4] Young D J, Daniel A C. Explosion characteristics of hydrogen-air mixtures in a spherical vessel[J]. Process Safety Progress, 2010,29(3):216-223.

[5] Tang Cheng-long, Huang Zuo-hua, Jin Chun, et al. Explosion characteristics of hydrogen-nitrogen-air mixtures at elevated pressures and temperatures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009,34(1):554-561.

[6] Bjerketvedt D, Bakke J R, Wingerden K V, et al. Gas explosion hand book[J]. Journal of hazardous,1997,52(1):1-150.

[7] 暴秀超,刘福水. 氢气/空气混合气层流燃烧速度的实验测量与模拟计算[J]. 燃烧科学与技术,2011,17 (5):407-413.

[8] Sun Zuo-yu, Liu Fu-Shui , Bao Xiu-Chao, et al. Research on cellular instabilities in outwardly propagating spherical hydrogen-air flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37(9):7889-7899.

[9] Schroeder V, Holtappels K. Explosion characteristics of hydrogen-air hydrogen-oxygen mixtures at elevated pressures[C]// Proceedings of 1st International Conference on Hydrogen Safety. Pisa, Italy, 2005.

Experimental study on hydrogen constant volume combustion*

Bao Xiu-chao[1], Liu Fu-shui[2], Chen Chao[1]

(1. *School of Transportation and Automotive Engineering, Xihua University, Chengdu* 610039, *Sichuan, China*;
2. *School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Hydrogen constant volume combustion was investigated by using a constant volume combustion bomb and a high-speed data acquisition system. The pressure change in the hydrogen constant volume combustion bomb was summarized and the rules of the combustion-explosion pressure and the explosion constant were generalized. The combustion pressure changing in the constant volume bomb with central ignition can be described in the following process. The combustion which was interfered by ignition was at a constant pressure, the pressure increased slowly at first, and then increased rapidly during the combustion. There would be a pressure oscillation in the later half stage of the combustion. If it was not under the extreme conditions, the explosion peak pressure increased firstly and then decreased with the fuel equivalence ratio increasing. There was almost a linear relation between the initial pressure and the peak pressure. The explosion pressure and peak pressure decreased with the initial temperature increasing. The explosion constant increased firstly and then decreased with the fuel equivalence ratio increasing, too. When the fuel equivalence ratio was lower than 4, the explosion constant increased with the initial pressure increasing, or vice versa. When the fuel equivalence ratio was lower than 2.5, the explosion constant decreased with the temperature increasing. And when the fuel equivalence ratio was higher than 2.5, it was just the opposite.

Key words: mechanics of explosion; explosion constant; constant volume combustion; hydrogen; explosion pressure

---

* Received 17 April 2013; Revised 23 September 2013
Corresponding author: Bao Xiu-chao, baoxiuchao@163.com

(责任编辑　王易难)