

高压物理学报

氢气比例和点火能量对CH₄-H₂混合气体爆炸强度影响的实验研究

马秋菊 邵俊程 王众山 刘家平

Experimental Study of the Hydrogen Proportion and Ignition Energy Effects on the CH₄-H₂ Mixture Explosion Intensity

MA Qiuju, SHAO Juncheng, WANG Zhongshan, LIU Jiaping

引用本文:

马秋菊, 邵俊程, 王众山, 等. 氢气比例和点火能量对CH₄-H₂混合气体爆炸强度影响的实验研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1):015201. DOI: 10.11858/gywlb.20190803

MA Qiuju, SHAO Juncheng, WANG Zhongshan, et al. Experimental Study of the Hydrogen Proportion and Ignition Energy Effects on the CH₄-H₂ Mixture Explosion Intensity[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1):015201. DOI: 10.11858/gywlb.20190803

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190803>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度与CO气体耦合作用对瓦斯爆炸界限影响实验

Experimental Study on the Coupling Influence of Temperature and CO Concentration on CH₄ Explosion Limit

高压物理学报. 2019, 33(4): 045203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180612>

环境温度对多相混合物爆炸特性影响的实验研究

Experimental Study on the Effects of Ambient Temperature on Explosion Characteristics of Multiphase Mixtures

高压物理学报. 2019, 33(4): 045202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180648>

爆炸下限临界浓度丙烷-空气混合过程及可燃性研究

Mixing and Explosion Process of Propane-Air at Lower Flammable Limit in Confined Vessel

高压物理学报. 2017, 31(5): 629 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.017>

封闭空间内瓦斯浓度对瓦斯爆炸反应动力学特性的影响

Effect of Gas Concentration on Kinetic Characteristics of Gas Explosion in Confined Space

高压物理学报. 2017, 31(2): 135 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.02.005>

转弯结构对其前方直巷内气体爆炸冲击波的影响

Influence of Bend Structure on Air Shockwave Generated from Gas Explosion in the Straight Tunnel before the Bend

高压物理学报. 2017, 31(4): 409 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.009>

聚能装药爆炸喷涂WC/Co涂层制备实验研究

Coatings of WC/Co Prepared by a Shaped Charge Explosion

高压物理学报. 2017, 31(2): 169 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.02.009>

氢气比例和点火能量对 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 混合气体爆炸强度影响的实验研究

马秋菊^{1,2}, 邵俊程¹, 王众山¹, 刘家平¹

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:在 20 L 标准球形爆炸罐内开展了当量比为 1 的甲烷-氢气-空气混合气体爆炸实验, 通过改变点火能量和氢气体积分数, 探讨点火能量和气体比例对其爆炸压力和爆炸强度的影响。研究发现: 氢气比例越高, 爆炸冲击波传播速度越快, 点火能对冲击波传播速度的影响相对较小; 点火能量的提高对峰值超压有增强作用, 氢气比例低时, 此增强作用较显著, 氢气比例高时, 此增强作用较弱; 点火能量对爆炸强度指数 K_G 的影响较小, 而氢气比例对爆炸强度指数 K_G 的影响十分明显, 氢气比例低于 50% 时, 氢气比例的增加对爆炸强度的增强作用较弱, 氢气比例高于 50% 时, 氢气的增加对爆炸强度的激励作用急剧增强。另外发现, 相同当量比条件下, 氢气的爆炸强度指数近似为甲烷爆炸强度指数的 10 倍。

关键词: $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 混合气体; 点火能量; 氢气比例; 爆炸超压; 爆炸强度指数

中图分类号: O381; TD712.7

文献标识码: A

气体爆炸是工业生产安全和人民生活安全的重大威胁之一。可燃气体的生产、经营、贮存、运输和使用等全过程均有可能引发爆炸事故, 造成严重的财产损失和人员伤亡。目前针对可燃气体爆炸的研究成果较多, 但是大多集中在对某种单一气体爆炸特性的研究, 极少关注多元混合可燃气体混合物的爆炸特性及灾害后果, 而多元可燃气体混合物在工业生产以及生活燃料中的使用非常普遍, 如天然气、液化气、石油提炼产物气体及新能源气体等。其中, 关于氢气-甲烷混合物的安全性研究, 对新的清洁能源的安全使用具有深远的意义。已有研究表明, 在目前使用的天然气中加入体积分数为 8%~30% 的氢气可以有效降低 NO_x 及 CO_2 等污染性气体的排放, 同时又不需要更改现有的使用设备^[1]。但是目前关于 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 混合燃料使用安全性的研究无论广度还是深度都远不能满足实际应用需要。氢气十分敏感, 燃烧速度快, 爆炸极限范围大, 最小点火能低, 导致其爆炸危险性非常高^[2], 因此, 即使有少量氢气加入甲烷气体中也会大大提高其爆炸敏感性, 增强爆炸强度, 提高爆炸危险^[3]。Yu 等^[4] 研究指出, 氢气的存在会显著增加 CH_4 的层流燃烧速度。Middha 等^[5] 通过数值模拟研究发现, 混有氢气的天然气在隧道内泄漏爆炸产生的压力远低于纯氢气爆炸压力, 但是纯甲烷泄漏形成接近化学计量浓度的气云爆炸时会产生比 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 气云爆炸更高的压力。另外, 实验研究和事故案例分析表明, 点火能量对气体爆炸极限范围有较大影响, 同时也会影响最终的气体爆炸压力、压力上升速率和火焰传播速度^[6-9]。在有氢气存在的情况下, 点火能量如何影响甲烷气体的爆炸特性有待进一步研究。

本工作针对不同氢气含量的 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 混合燃料, 研究其在不同点火能量作用下的爆炸特性, 主要探讨气体浓度、混合气体组分比例及点火能量等因素对 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 混合气体爆炸特性的影响。

* 收稿日期: 2019-07-03; 修回日期: 2019-07-23

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC08003300); 爆炸科学与技术国家重点实验室(北京理工大学)开放课题(KFJJ18-03M); “煤炭资源与安全开采”国家重点实验室开放基金(SKLCRSM19KFA11)

作者简介: 马秋菊(1987—), 女, 博士, 讲师, 主要从事燃爆动力学研究. E-mail: ma200609@126.com

1 实验装置

实验在 20 L 标准球形爆炸罐内完成,实验系统主体为 20 L 球形爆炸装置,并配有配气系统、点火系统、数据采集系统以及其他附属装置。20 L 球形爆炸罐实物如图 1(a)所示,各装置之间连接如图 1(b)所示。本实验中将用到氢气,其密度较小,容易发生分层现象,为了使实验中配置的预混气体混合较为均匀,特别在爆炸罐体内部安装搅拌器,通过外部遥控装置进行开关控制,每次配气完成后开启搅拌器 3 min,之后静置 1 min,避免气体运动对爆炸结果产生影响。点火电极由爆炸罐上端伸入罐体内部,处于爆炸罐体近似几何中心位置,采用电火花放电方式进行点火。电火花持续放电时间和放电储能电容值均可以根据需要进行调节,点火能量测试系统可以通过对放电电压电流曲线进行积分获得点火能量。爆炸压力传感器安装在装置侧壁上。

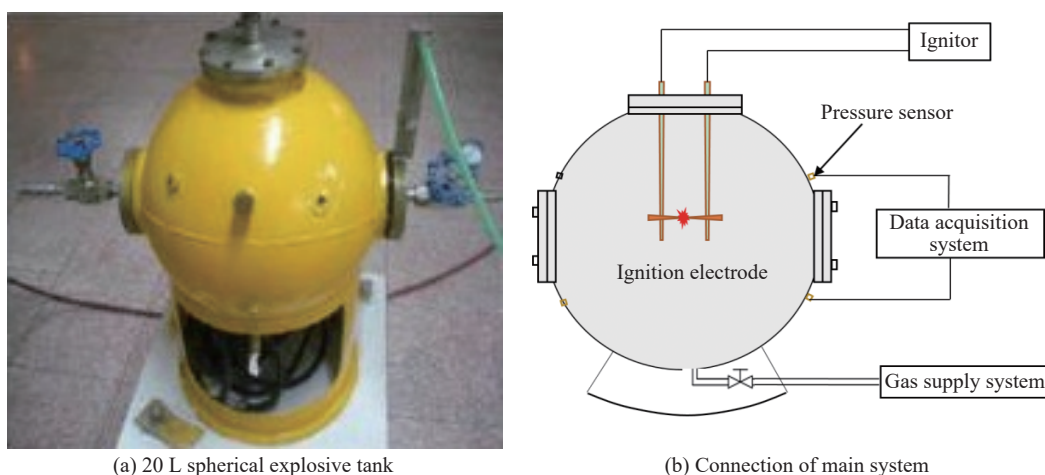


图 1 20 L 球形爆炸罐及实验装置
Fig. 1 20 L spherical explosion vessel and experimental devices

2 实验设置

对于多元可燃气体混合物,其浓度可以用燃料当量比来表示,燃料当量比(ψ)用下式进行计算

$$\psi = \frac{F/A}{(F/A)_{\text{stoic}}} \quad (1)$$

式中: F/A 为燃料-空气比, $(F/A)_{\text{stoic}}$ 为化学计量浓度下的燃料-空气比。 $\psi < 1$ 表示贫燃料混合物, $\psi = 1$ 表示化学计量浓度下的混合物, $\psi > 1$ 表示富燃料混合物。

针对化学剂量浓度,即 $\psi = 1$ 条件下的 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 气体混合物进行爆炸实验。混合燃料中氢气的体积分数表示为

$$X = \frac{V_{\text{H}_2}}{V_{\text{H}_2} + V_{\text{CH}_4}} \quad (2)$$

式中: V_{H_2} 和 V_{CH_4} 分别为混合燃料中 H_2 和 CH_4 的体积。

本实验取氢气体积分数 X 分别为 0、0.1、0.3、0.5、0.7 和 1.0,混合燃料与空气预混成当量比 $\psi = 1$ 的可燃混合气体,各组分比例见表 1,其中 w 为质量分数。根据分压法原理,计算出不同组分比例条件下各组分分压值,对 20 L 球形爆炸罐抽真空后,根据分压值依次充入 CH_4 、 H_2 、空气,配制出所需比例的混合气体。

表 1 实验中 $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-Air}$ 混合物的组分比例

Table 1 Mixture compositions in the explosion test

$X/\%$	Equivalence ratio $\psi = 1$		
	$w(\text{H}_2)/\%$	$w(\text{CH}_4)/\%$	$w(\text{Air})/\%$
0	0	9.50	90.50
0.3	3.58	8.35	88.07
0.5	7.19	7.19	85.62
0.7	12.67	5.43	81.90
1.0	29.58	0	70.42

3 结果与分析

3.1 爆炸压力

实验获得不同氢气比例的混合物在不同点火能量点火时的爆炸超压-时间历程曲线, 如图 2 所示, 各组曲线的变化趋势相似。点火电极在罐体中心点火后, 爆炸冲击波以近似球形向四周传播, 传播到罐体壁面处, 压力逐渐上升, 很快达到最大值。然后, 由于燃料燃烧殆尽, 罐体热量损失, 爆炸罐内温度迅速降低, 气体产物水发生液化, 罐体内压力开始下降, 最终罐体内压力为负压。从不同氢气比例各组曲线可知, 氢气比例越高, 冲击波超压达到峰值所需的时间越短, 即冲击波的传播速度越大。点火能量对峰值超压有一定影响, 点火能量越高, 峰值超压越高。而不同点火能量作用下, 冲击波峰值超压到达的时间比较接近, 说明点火能量对冲击波传播速度的影响较小。

实验所得不同氢气比例的混合物的峰值超压随点火能量的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 随着点火能量的升高, 峰值超压增大, 但是氢气比例不同时, 其峰值超压上升趋势有所不同: 氢气比例较低($X \leq 0.5$)时, 点火能量从 0.2 J 上升到 0.8 J 时峰值超压的增强较显著, 而点火能量从 0.8 J 继续增大后, 峰值超压的增长相对缓慢; 氢气比例较高($X > 0.5$)时, 点火能量的增大对峰值超压的增强作用较弱, 并且随着点火能量的增大, 峰值超压呈现近似线性增大。这主要是因为氢气的最小点火能较甲烷的最小点火能低, 很低的能量就能达到较强的爆炸强度, 本研究所取的点火能量相对最小点火能高, 因此氢气比例高时, 混合物在实验所取 4 个点火能量下都能达到较高的爆炸强度, 不会因为点火能量的增大而显著提高爆炸强度。而氢气比例低时, 燃料中主要成分为甲烷, 而甲烷的爆炸强度对点火能量的变化比较敏感, 因此, 随着点火能量的增大, 特别是点火能量较低时, 峰值超压升高比较明显。

以氢气组分的体积分数为横坐标作图, 得到图 4。爆炸峰值超压随着氢气比例的增加而显著升高, 主要因为氢气活性远高于甲烷, 化学反应速度快, 爆炸反应时间短, 氢气比例的升高增强了能量释放的集中程度, 同时又缩短了热量损失的时间, 散热量减少, 因此峰值超压会随着氢气比例的升高而上升。

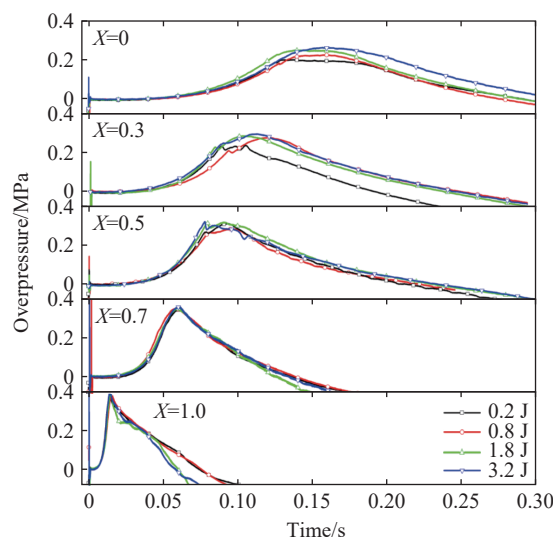


图 2 爆炸超压-时间历程曲线

Fig. 2 Overpressure-time curves for each case

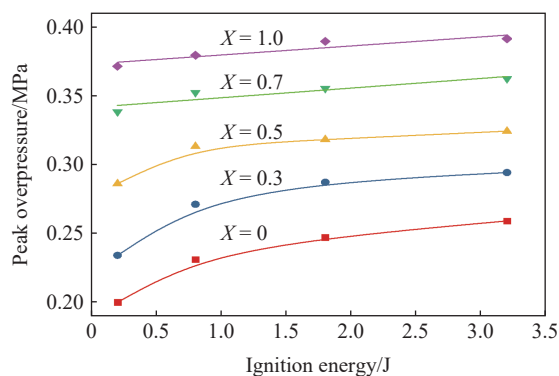


图 3 不同氢气体积分数时峰值超压随点火能量的变化

Fig. 3 Peak overpressure varying with ignition energy under different volume fractions of hydrogen

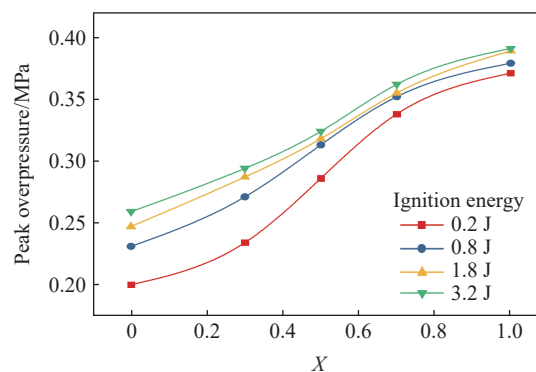
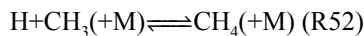


图 4 不同点火能量下峰值超压随氢气体积分数的变化

Fig. 4 Peak overpressure varying with volume fraction of hydrogen under different ignition energies

从化学反应动力学角度分析可知, 甲烷燃烧的详细基元反应模型 GRI3.0 机理(53 个组分、325 个基元反应)中关于 CH_4 主要生成和消耗的基元反应为



而基元反应“ $\text{H} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{OH}$ (R38)”在所有基元反应中敏感性最高^[10], 增加氢气会显著提高基元反应 R38 的正向反应速率^[11], 因此会明显促进 CH_4 的消耗。

另外, 点火能量越低, 氢气对甲烷爆炸的增强作用越明显。点火能量为 0.2 J 时, 氢气的加入对甲烷爆炸强度的增强作用最明显。

3.2 爆炸强度指数

气体爆炸过程中的“爆炸强度指数”(Gas explosion severity index)定义为爆炸过程中的最大压力上升速率和爆炸容器体积三次方根的乘积, 可表示为

$$K_G = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} V^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

式中: K_G 为爆炸强度指数, V 为爆炸装置的体积, $\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max}$ 为最大爆炸压力上升速率。

K_G 是表征气体爆炸猛烈程度的重要参数, 也是表征气体爆炸危险性的定量指标。对于某种特定的气体在密闭容器内爆炸, 其 K_G 是一个常数, 与爆炸容器的体积无关^[12-13], 对于多元混合燃料气体爆炸, 气体组分不同, 则 K_G 值不同, 因此, 标准温度和压力下的 K_G 值大小可以表征气体爆炸猛烈强度的高低。

化学计量浓度 $\varphi=1$ 时, 在不同点火能量下, 实验所得到的各混合物的爆炸强度指数随氢气比例的变化曲线如图 5 所示。对比不同点火能量条件下的 4 组实验结果可知, 点火能量对 K_G 的影响较小, 主要是由于实验所设定的点火能量远高于最小点火能, 并且混合物均为化学计量浓度, 爆炸化学反应比较充分, 爆炸强度高, 点火能量的变化并不会对 K_G 产生明显的影响。

另外, 从图 5 可知, 氢气比例的不同对 K_G 的影响十分明显。对于不同燃料组分的混合物, 当氢气比例 $X < 0.5$ 时, 混合气体中氢气比例的增加对爆炸强度的增强作用并不显著, 此阶段的爆炸强度指数与氢气比例近似为线性增长关系, 说明氢气的加入对爆炸强度的激励作用相对较弱。但是当氢气比例 $X > 0.5$ 时, 随着氢气比例的增加, 爆炸强度指数曲线加速升高, 说明氢气的加入对爆炸强度的激励作用急剧增强。对于纯 CH_4 -Air ($X=0$) 混合物, 0.2、0.8、1.8 和 3.2 J 点火能量条件下的爆炸强度指数 K_G 分别为 6.79、6.71、7.06、6.93 $\text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而对于纯 H_2 -Air ($X=1.0$) 混合物, 4 个点火能量下的 K_G 分别是 65.15、64.32、69.90、72.49 $\text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 显然, 氢气的爆炸强度指数近似为相应的甲烷爆炸强度指数的 10 倍。

4 结 论

以当量比 $\varphi=1$ 的不同比例 CH_4 - H_2 混合气体为研究对象, 对其在 20 L 球形爆炸装置内的爆炸参数进行了实验研究, 探讨了点火能量和氢气比例对混合物爆炸压力及爆炸强度的影响。

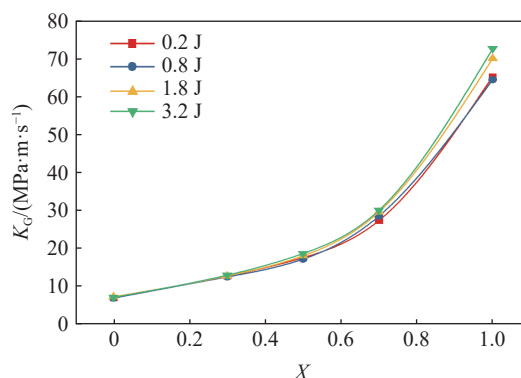


图 5 不同点火能时 K_G 随氢气体积分数的变化

Fig. 5 K_G varying with the volume fraction of hydrogen under different ignition energies

(1) 氢气比例越高, 冲击波超压达到峰值所需的时间越短, 冲击波的传播速度越快。不同点火能量作用下, 冲击波峰值超压到达的时间比较接近, 点火能量对冲击波传播速度的影响较小。

(2) 点火能量的提高对峰值超压有增强作用。氢气比例较低($X \leq 0.5$)时, 点火能量对峰值超压的增强作用较显著; 氢气比例较高($X > 0.5$)时, 点火能量的增大对峰值超压的增强作用较弱, 此时, 随着点火能量的增大, 峰值超压呈近似线性增大。

(3) 点火能量对爆炸强度指数 K_G 的影响较小, 而氢气比例的不同对 K_G 的影响十分明显, 氢气比例低时, 氢气的增加对爆炸强度的增强作用相对较弱, 氢气比例较高时, 氢气的增加对爆炸强度的激励作用急剧增强。

(4) 相同当量比条件下, 氢气的爆炸强度指数近似为甲烷爆炸强度指数的 10 倍, 氢气的加入会大大增加甲烷气体爆炸的危险性。

参考文献:

- [1] SHRESTHA S O B, KARIM G A. Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1999, 24(6): 577–586.
- [2] WIERZBA I, KILCHYK V. Flammability limits of hydrogen-carbon monoxide mixtures at moderately elevated temperatures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001, 26(6): 639–43.
- [3] TROINAI G. Effect of velocity inflow conditions on the stability of a CH₄/air jet-flame [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(2): 539–42.
- [4] YU G, LAW C K, WU C K. Laminar flame speeds of hydrocarbon air mixtures with hydrogen addition [J]. *Combustion and Flame*, 1986, 63(3): 339–47.
- [5] MIDDHA P, ENGEL D, HANSEN O R. Can the addition of hydrogen to natural gas reduce the explosion risk? [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(3): 2628–2636.
- [6] 仇锐来, 张延松, 张兰, 等. 点火能量对瓦斯爆炸传播压力的影响实验研究 [J]. *煤矿安全*, 2011, 42(7): 8–11.
QIU R L, ZHANG Y S, ZHANG L, et al. Experimental study on impact of ignition energy on gas explosion dissemination pressure [J]. *Safety in Coal Mines*, 2011, 42(7): 8–11.
- [7] 李润之, 司荣军. 点火能量对瓦斯爆炸压力影响的实验研究 [J]. *矿业安全与环保*, 2010, 37(2): 14–16, 19.
LI R Z, SI R J. Experiment study on the effects of ignition energy on the methane explosion overpressure [J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2010, 37(2): 14–16, 19.
- [8] 康杨, 白桥栋, 翁春生. 不同点火因素对爆轰波传播影响的数值模拟 [J]. *南通大学学报(自然科学版)*, 2015, 14(1): 8–15.
KANG Y, BAI Q D, WENG C S. Numerical simulation of the effect of different ignition factors on detonation wave propagation [J]. *Journal of Nantong University (Natural Science Edition)*, 2015, 14(1): 8–15.
- [9] 仇锐来. 点火能量对瓦斯爆炸传播的数值模拟研究 [J]. *煤矿安全*, 2011, 42(1): 5–8.
QIU R L. Numerical simulation of the effect of ignition energy on the gas explosion propagation [J]. *Safety in Coal Mines*, 2011, 42(1): 5–8.
- [10] LAW C K. *Combustion physics* [M]. New York: Cambridge University Press, 2006: 95.
- [11] SHER E, REFAEL S. A simplified reaction scheme for the combustion of hydrogen enriched methane/air flame [J]. *Combustion Science and Technology*, 1988, 59(4): 371–389.
- [12] RAZUS D, MOVILEANU C, OANCEA D. The rate of pressure rise of gaseous propylene-air explosions in spherical and cylindrical enclosures [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 139(1): 1–8.
- [13] National Fluid Power Association. Guide for venting of deflagrations: NFPA 68-1998 [S]. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1998: 92–95.

Experimental Study of the Hydrogen Proportion and Ignition Energy Effects on the CH₄-H₂ Mixture Explosion Intensity

MA Qiuju^{1,2}, SHAO Juncheng¹, WANG Zhongshan¹, LIU Jiaping¹

(1. *State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: CH₄-H₂ mixture explosion experiments were performed in a 20 L spherical explosion vessel with the equivalence ratio of 1. Gas proportion and ignition energy were varied to explore their effects on the explosion pressure and intensity. It is found that higher hydrogen proportion causes higher explosion shock wave propagation speed, while the ignition energy has little effects on the explosion shock wave propagation speed. Higher ignition energy can enhance the explosion overpressure, and this enhancement effect is remarkable when the hydrogen proportion is lower, and is not evident when the hydrogen proportion is higher. The effect of ignition energy on the explosion severity index K_G is not evident, but the effect of hydrogen proportion on K_G is remarkable. The positive effect of hydrogen addition on K_G is very slight at low hydrogen proportion while it becomes much more pronounced at higher hydrogen contents. Furthermore, the explosion intensity of hydrogen is approximately tenfold of that of methane explosion with corresponding same equivalent ratio, and therefore, the presence of hydrogen will greatly enhance the explosion hazard of methane.

Keywords: CH₄-H₂ mixture; ignition energy; hydrogen proportion; explosion overpressure; gas explosion severity index