

文章编号: 1003-1480 (2024) 02-0086-07

乙醇/甲烷/氢气预混气体爆炸特性研究

闫晨朝, 王筱蓉, 姜根柱

(江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江, 212000)

摘要: 为了进一步了解 $C_2H_5OH/CH_4/H_2$ 预混气体的爆炸特性, 在定容燃烧弹内对不同当量比 (0.7~1.4)、不同初始温度 (370, 400, 450 K)、不同乙醇掺混比例 (20%, 50%, 80%) 的 $C_2H_5OH/CH_4/H_2$ 预混气体的爆炸特性进行实验研究及分析。结果表明: 爆炸压力峰值与初始温度呈线性负相关, 与乙醇掺混比例呈线性正相关; 随着当量比的增大, 爆炸压力峰值和最大爆炸压力上升速率均呈现先增大后减小的规律, 其峰值出现在当量比为 1.2 或 1.3 处, 而爆炸时间呈现先降低后略有增大的规律; 相同初始温度下, 随乙醇掺混比例的增大, 预混气体放热量增大, 在当量比为 1.2 时达到峰值。

关键词: 预混气体; 乙醇/甲烷/氢气; 爆炸特性; 爆炸压力; 压力上升速率; 爆燃指数; 爆炸时间

中图分类号: TJ510.4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.02.015

Study on the Explosion Characteristics of Ethanol/Methane/Hydrogen Premixed Gas

YAN Chen-zhao, WANG Xiao-rong, JIANG Gen-zhu

(School of Mechanical and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, 212100)

Abstract: In order to further understand the explosion properties of $C_2H_5OH/CH_4/H_2$ premixed gas, the experimental study and analysis were carried out for $C_2H_5OH/CH_4/H_2$ premixed gases under conditions of different equivalent ratios (0.7~1.4), different initial temperatures (370,400,450K) and different adding ratios of ethanol (20%, 50%, 80%) in constant volume combustion bombs. The results show that the peak explosion pressure is negatively correlated with initial temperature, while has a positive linear correlation with the ethanol adding ratio; With the increase of equivalent ratio, the peak explosion pressure and the peak pressure rise rate all show the law of first increasing and then decreasing, the peak values appear in the equivalent ratio of 1.2 or 1.3, while the explosion time show the law of first decreasing then increasing slightly; As the same initial temperature, the heat release value of the premixed gas increase with the increase of adding ratio of ethanol, the value reaches maximum as the equivalent ratio of 1.2.

Key words: Premixed gas; Ethanol-methane-Hydrogen; Explosion properties; Explosion pressure; Pressure rise rate; Deflagration index; Explosion time

基于氢燃烧清洁、不产生温室气体, 并且具有较高的储存能力的特点, 其在清洁能源领域的应用非常广泛^[1]。然而, 由于极低的点火能量、极宽的爆炸极限和较高的层流燃烧率, 氢的爆炸风险远高于其他碳氢燃料^[2]。目前大多在封闭空间内进行乙醇重整制氢,

因此存储装置存在泄漏的风险, 使得制取的氢气不纯、混有乙醇, 进而导致氢气混入天然气时掺混有乙醇, 从而使混氢天然气在运输过程中的安全隐患大大增加; 同时, 混氢天然气管道运输过程中气体分布并不均匀, 局部的乙醇含量无法确切知晓。因此, 为了确

收稿日期: 2023-11-03

作者简介: 闫晨朝 (1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事能源、燃烧特性研究。

通讯作者: 姜根柱 (1979-), 男, 高级实验员, 主要从事仿生推进与燃烧研究。

基金项目: 江苏省研究生创新基金项目 (No.SJCX22_1913)。

引用本文: 闫晨朝, 王筱蓉, 姜根柱. 乙醇/甲烷/氢气预混气体爆炸特性研究[J]. 火工品, 2024(2): 86-92.

保安全和能源有效利用,有必要探索 and 了解乙醇/甲烷/氢气在各种条件下的爆炸特性。

针对 $C_2H_5OH/CH_4/H_2$ 单一可燃性气体的爆炸特性,国内外学者进行了广泛研究。Zhang 等^[3]实验研究了球形压力容器中的 H_2 /空气预混气的爆炸特性,研究发现随着压力的增加,爆炸压力与压力上升速率均呈增大状态。Zheng 等^[4]用透明管道分析了点火位置和当量比对预混 H_2 /空气混合物爆炸特性的影响,发现点火位置与当量比在氢火焰结构演化中起着重要的作用。Mei 等^[5]对不同弯道角度中的氢爆炸过程中的火焰传播进行了数值研究,发现弯管结构缩短了压力波的反射距离,爆炸超压的振荡频率和增长范围可以远高于直管中的振动频率和增长范围。LI 等^[6]对贫 H_2/CH_4 /空气预混气体进行研究,通过实验和数值方法研究得出,对爆炸的影响主要体现在由热损失变化引起的火焰速度和爆炸时间。Tao Wang 等^[7-8]研究了气体混合物在贫、化学计量和富条件下的爆炸行为,指出 C_2H_6 、 C_2H_4 、 CO 、 H_2 和其他气体可以扩大 CH_4

爆炸的可燃极限范围,增加了 CH_4 爆炸的危险性。

有关单一或者二元气体的爆炸特性研究较多,但是关于三元混合燃料的研究较少^[9]。虽然少数学者对 $C_2H_5OH/CH_4/H_2$ 三元预混气体的层流火焰速度进行了研究,但对爆炸特性参数 P_{max} 、 $(dp/dt)_{max}$ 、 t_c 研究较少^[10]。本研究利用定容燃烧弹,研究乙醇掺混比例、初始温度及当量比对 $C_2H_5OH/CH_4/H_2$ 预混气体爆炸特性的影响,进而得到爆炸特性参数的变化规律,为理解爆炸过程、评估燃烧设备的安全性以及指导防爆装置的设计提供参考。

1 实验

1.1 实验装置

实验装置由定容燃烧弹、高速纹影照相系统、点火系统、数据采集系统和气体转换系统组成,如图1所示。

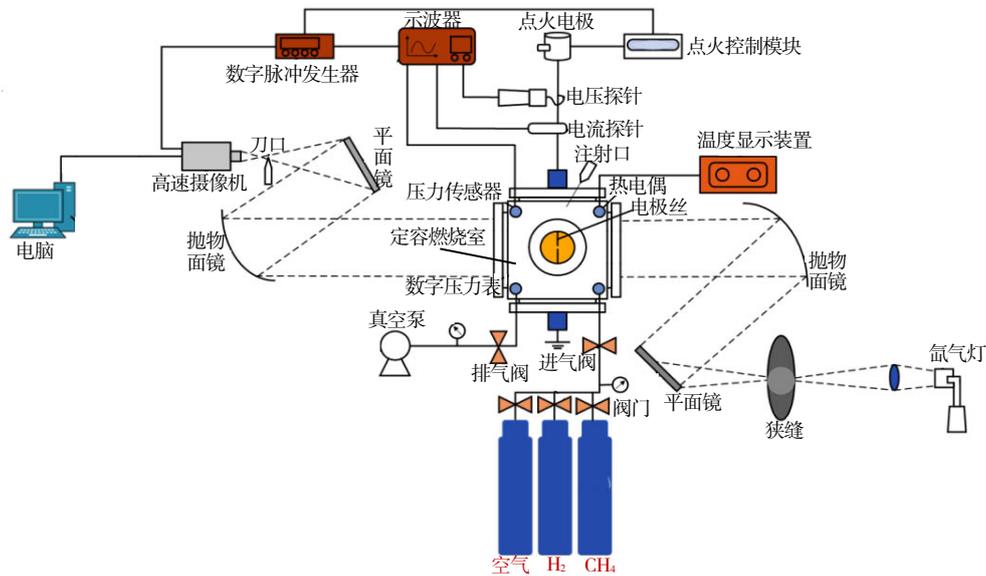


图1 实验装置简图

Fig.1 Experimental device diagram

定容燃烧弹为立方体结构,由优质40Cr钢制成,容积为1.94 L,内部半径79.02mm,具有3个交叉的气缸。燃烧室两侧装有石英玻璃窗,具有耐高温和高透光性的优点,并可提供直径90 mm的光学通道。为了精确控制温度,筒体壁上的加热电极由PID控制器进行控制。采用K型热电偶(WRNC-231,精度

$\pm 0.75\%$)和高精度压力传感器(Keller LEX1,精度0.001 Pa)分别测量可燃预混气体的初始温度和压力。预混燃气的初始压力由数字压力表(精度 $\pm 0.05\%$)确定。实验的采样频率为312.5 kHz,以确保实验数据的高频率准确采集。可燃预混气体在定容燃烧弹中使用2个直径为0.4mm的相对电极点燃。2个电极连

接到点火控制系统和点火线圈上,协同控制点火,电极丝之间的间隙为1.0~1.2mm,实验的最小点火能量为15mJ。可燃预混气体点火后形成膨胀的球形火焰向外扩散,火焰的传播过程采用纹影系统记录下来,通过高速摄像机拍摄球形火焰传播图像,记录频率为12 800 fps,分辨率为 $10^{24} \times 10^{24}$ Pixels。本实验使用的空气由79%的氮气和21%的氧气组成,所有气体的纯度至少99.9%。混合气充分混合3 min,同步触发点火和压力传感器,得到爆炸压力数据。

实验研究不同当量比、不同乙醇掺混比例的可燃预混气体的爆炸特性,每种工况至少进行3次实验,以保证实验的准确性和重复性。当量比 ϕ 为化学计量空燃比与实际空燃比之比,范围为0.7~1.4,区间为0.1。 $C_2H_5OH/CH_4/H_2$ 燃料中的乙醇掺混比例 $X_{C_2H_5OH}$ 定义为:

$$X_{C_2H_5OH} = \frac{V_{C_2H_5OH}}{V_{H_2} + V_{CH_4} + V_{C_2H_5OH}} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: $V_{C_2H_5OH}$ 、 V_{CH_4} 、 V_{H_2} 分别为 $C_2H_5OH/CH_4/H_2$ 燃料中的 C_2H_5OH 、 CH_4 、 H_2 的体积分数。本实验中乙醇掺混比例分别为20%、50%、80%, V_{H_2}/V_{CH_4} 固定为1:4。

1.2 数据处理

爆炸压力峰值 P_{max} ,最大压力上升速率 $(dp/dt)_{max}$ 、爆燃指数 K_G 以及爆炸时间 t_c 是评估可燃预混气体爆炸特性的重要参数^[11-14], P_{max} 为爆炸压力峰值, $(dp/dt)_{max}$ 为压力随时间变化曲线上上升阶段斜率的最大值, t_c 为点火时刻与到达 P_{max} 之间的时间间隔。最大压力上升率 $(dp/dt)_{max}$ 是描述爆炸积聚压力的重要参数,是估算爆燃指数 K_G 的一个重要参数^[15-17]。 K_G 与 $(dp/dt)_{max}$ 的关系如式(2)所示:

$$K_G = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} \times V^{1/3} \quad (2)$$

由式(2)可知:爆燃指数 K_G 与 $(dp/dt)_{max}$ 呈正比关系,由于燃烧室容积 V 是常数,所以上述二者具有同样的变化趋势。

实验过程中由于压力传感器的通道噪声效应,导致实验获取的原始压力曲线呈振荡状态,使爆炸参数的确定既困难又不准确。为了得到准确的压力曲线,

消除振荡影响,采用高斯滤波,得到滤波后的 $P_{filtered}$ 。 P_{max} 、 $(dp/dt)_{max}$ 和 t_c 等参数可以通过滤波后的 $P_{filtered}$ 直接获取。

2 结果与讨论

2.1 爆炸参数的获取

初始温度370 K、初始压力0.1 MPa、乙醇掺混比例20%及当量比0.7下获得的爆炸参数如图2所示。由图2可见,预混气体点火后,爆炸压力迅速增加,达到峰值 P_{max} 后缓慢下降,这是由于火焰前锋面不断接近定容燃烧弹内壁表面,加剧了热损失,导致压力下降。压力上升速率 dp/dt 在达到峰值后受到热损失加剧和爆炸压力下降的影响,也开始下降,最终变成负值。

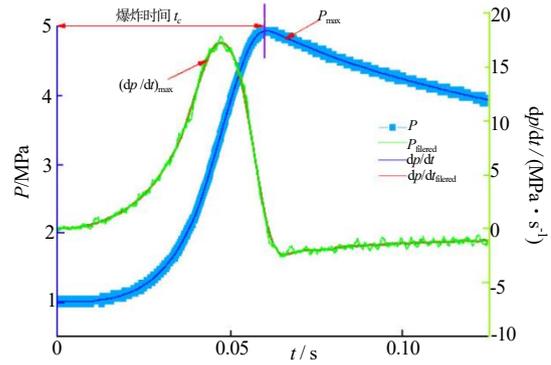


图2 获取的爆炸参数

Fig.2 The obtained explosion parameters

2.2 爆炸压力

在初始温度370K、压力0.1MPa、当量比1.0的工况下,乙醇掺混比例对爆炸压力演变的影响如图3所示。

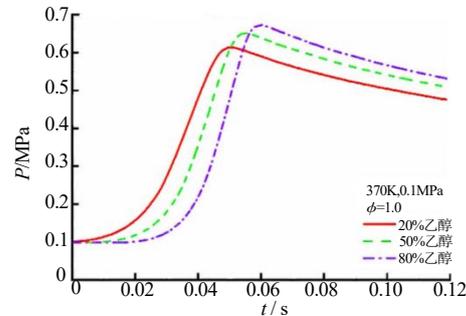


图3 不同乙醇掺混比例下的爆炸压力随时间的变化曲线

Fig.3 Explosion pressure vs time curve under different ethanol adding ratios

由图3中可以看出所有压力演变都呈类似的趋势,

即压力逐渐增加到峰值,然后由于热损失而降低。随着乙醇掺混比例的增大,压力上升越缓慢,到达峰值所需的时间越长。其原因可能是:一方面,由于乙醇掺混比例增大,可燃气体燃烧过程中热损失较少,爆炸压力达到峰值的时间增加,且乙醇相较于氢气-甲烷来说反应活性和扩散性较低^[13];另一方面,乙醇的反应速率小于氢气的反应速率,故乙醇掺混比例增大时,火焰燃烧速度降低。

在初始压力 0.1MPa、乙醇掺混比例含量 20%、当量比 1.0 的工况下,初始温度对爆炸压力演变的影响如图 4 所示。由图 4 可见,温度较高时压力的幅值较低,可燃预混气体达到压力峰值所需的时间较短。这是因为温度较高时,可燃预混气体具有更高的质量燃烧速率和火焰传播速度。

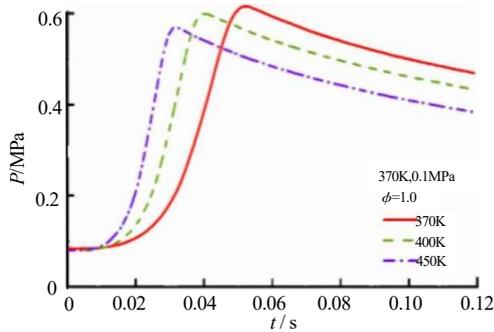


图 4 不同初始温度下的爆炸压力随时间的变化曲线
Fig.4 Explosion pressure vs time curves at different initial temperatures

2.3 爆炸压力峰值

在初始温度 370K、压力 0.1MPa 工况下,不同乙醇掺混比例下爆炸压力峰值随当量比的变化如图 5 所示。

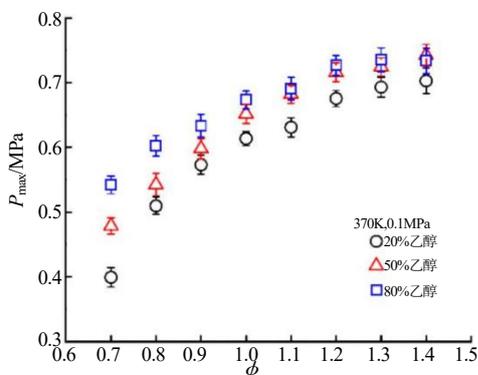


图 5 不同乙醇掺混比例下爆炸压力峰值随当量比的变化
Fig.5 Peak explosion pressure vs equivalent ratio curve under different ethanol adding ratios

由图 5 可以看出,爆炸压力峰值随着乙醇掺混比

例的增加而增大,随着当量比的增加先增大,在 1.3 处达到顶峰,继而有些许下降。这归因于乙醇相较于氢气、甲烷燃烧的热损失更小,相比乙醇掺混比例从 50%增加到 80%,20%到 50%的 P_{\max} 增量更小^[12]。

在乙醇掺混比例 50%、压力 0.1MPa 工况下,不同初始温度下爆炸压力峰值随当量比的变化如图 6 所示。

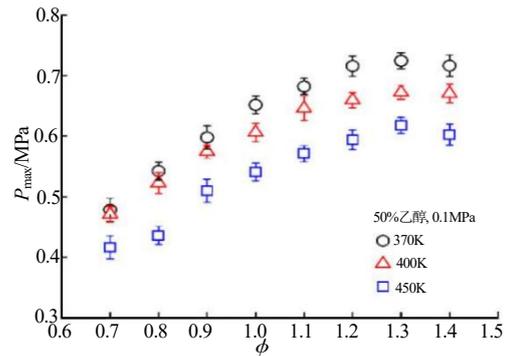


图 6 不同初始温度下爆炸压力峰值随当量比的变化曲线
Fig.6 Peak explosion pressure vs equivalent ratio at different initial temperatures

由图 6 中可以看出,爆炸压力峰值随着温度的降低而增大,随着当量比的增大先增大后减少,在当量比 1.3 处达到顶峰。温度较低时 P_{\max} 较高的原因是混合气体中未燃烧的 H_2 质量增加, H_2 爆炸产生较高热能,导致 P_{\max} 值增加。同样,当温度上升时,预混气体燃烧质量的减少和热损失也可能导致爆炸压力峰值降低。

在当量比 1.0、压力 0.1MPa 工况下,不同乙醇掺混比例下爆炸压力峰值随初始温度的变化如图 7 所示。由图 7 可以看出,爆炸压力峰值与温度呈线性关系,随着温度的增加,爆炸压力峰值线性递减。

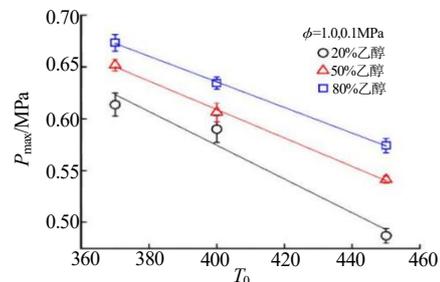


图 7 不同乙醇掺混比例下爆炸压力峰值随初始温度的变化
Fig.7 Peak explosion pressure vs initial temperature under different ethanol adding ratios

此外,乙醇掺混比例也对最大爆炸压力有影响,同一温度下,预混气体燃料内的乙醇掺混比例越大,

爆炸压力峰值也越大。这是由于随着乙醇掺混比例的增加,预混气体燃料颗粒间碰撞增加,从而增大爆炸强度,导致爆炸压力增大^[18],图7中曲线为拟合曲线,关系式如下:

$$E(P_{\max}) = a(X_E, \phi)T_0 + b(X_E, \phi) \quad (3)$$

式(3)中: $E(P_{\max})$ 表示不同乙醇掺混比例和当量比下随温度变化的压力峰值; $a(X_E, \phi)$ 表示曲线的斜率; $b(X_E, \phi)$ 表示曲线的截距。通过该关系式可在任意掺混比例和初始温度下预测可燃预混气体的爆炸特性。

在当量比1.0、压力0.1MPa下,不同初始温度下爆炸压力峰值随乙醇掺混比例的变化如图8所示。由图8中可以看出,爆炸压力峰值与乙醇掺混比例呈线性关系,随着乙醇掺混比例的增大,爆炸压力峰值呈线性递增。此外,温度也对爆炸压力峰值有影响,同一乙醇掺混比例下,温度越高,爆炸压力峰值反而越小。这是由于随着温度的增大,预混气体燃料颗粒间碰撞减弱,从而降低爆炸强度,导致爆炸压力减小。

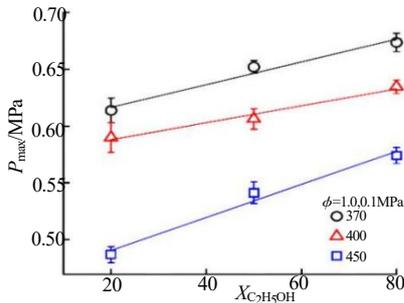


图8 不同温度下爆炸压力峰值随乙醇掺混比例的变化曲线
Fig.8 Peak explosion pressure vs ethanol adding ratio curve at different temperatures

2.4 爆炸压力上升速率和爆燃指数

在压力0.1MPa、初始温度370K、当量比1.0的工况下,不同乙醇掺混比例下氢气/甲烷/乙醇预混气体的爆炸压力上升速率随时间的变化如图9所示。

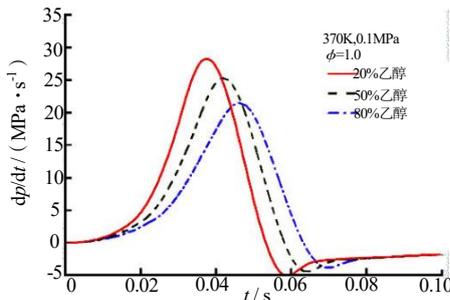


图9 不同乙醇掺混比例下爆炸压力上升速率随时间的变化曲线
Fig.9 Explosion pressure rise rate vs time curve under different ethanol adding ratios

由图9中可以看出,随着乙醇掺混比例的增大,爆炸压力上升速率的峰值呈下降趋势,并且到达峰值的时间更长。这是因为随着乙醇掺混比例的增大,氢气/甲烷/乙醇混合气体的反应活性和扩散能力较弱,反应释放热量较少,导致混合气火焰传播速度减慢,延长了爆炸反应时间,导致爆炸压力上升速率降低^[19]。

在初始压力0.1MPa、乙醇掺混比例20%、当量比1.0的工况下,爆炸压力上升速率随温度的变化如图10所示。由图10中可以看出,爆炸压力上升速率的峰值随着温度的增加反而下降,这与文献[11]中的研究结论一致。

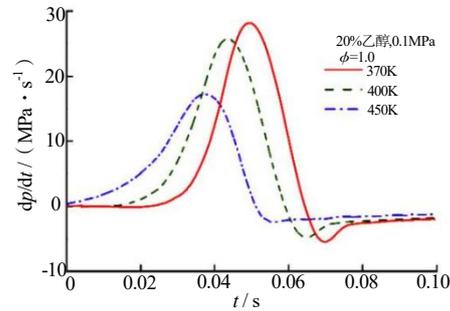


图10 不同初始温度下爆炸压力上升速率随时间的变化曲线
Fig.10 Explosion pressure rise rate vs time curve at different initial temperatures

实验各工况下的最大爆炸压力上升速率和爆燃指数随当量比 K_G 的变化如图11~12所示。

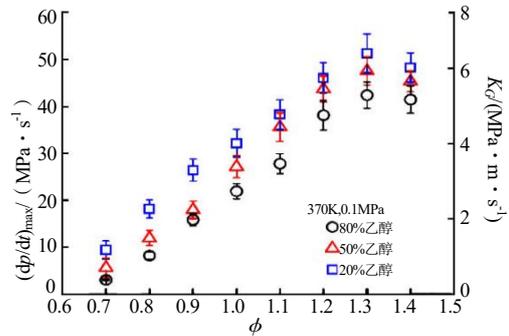


图11 不同乙醇掺混比例下最大爆炸压力上升速率和爆燃指数随当量比的变化

Fig.11 Peak explosion pressure rise rate and deflagration index vs equivalent ratio under different ethanol adding ratios

由图11~12中可以看出,最大爆炸压力上升速率和爆燃指数都随着当量比的增大先增大后减小,且在当量比为1.3时达到峰值。此外,随着温度的增大,最大爆炸压力上升速率和爆燃指数反而减小。主要是由于较高的温度下,一方面,燃料质量减少,导致燃烧释放热量减少,进而 $(dp/dt)_{\max}$ 减小;另一方面,较低温度下,火焰传播更加不稳定,导致 $(dp/dt)_{\max}$

增大。爆燃指数等级由国家消防局定义,其数值越高爆炸危险性越强。在所有的实验工况下,乙醇/甲烷/氢气预混气体的爆燃指数大部分都低于 $10\text{MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,处于中低爆燃指数水平,但是在一些工况下处于较高爆燃指数等级,因此设计存储装置要充分考虑燃爆指数^[20]。

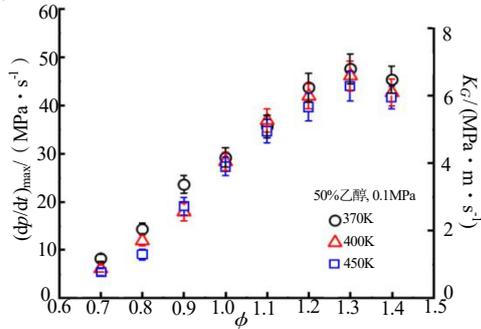


图 12 不同初始温度下最大压力上升速率和爆燃指数随当量比的变化

Fig.12 Peak pressure rise rate and deflagration index vs equivalent ratio at different initial temperatures

2.5 爆炸时间

对于爆炸危险的安全评估,爆炸时间 t_c 与爆炸压力、压力上升速率同等重要^[21]。初始温度为 370, 400, 450 K, 乙醇掺混比例 20%, 50%, 80% 条件下 t_c 随当量比的变化如图 13~14 所示。

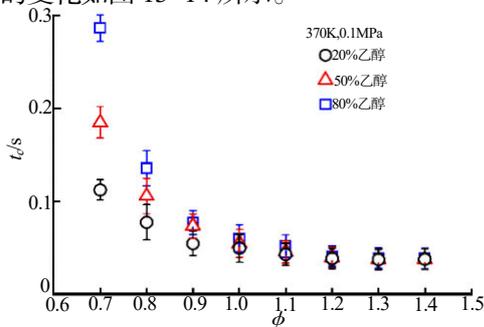


图 13 不同乙醇掺混比例下爆炸时间随当量比的变化

Fig.13 Explosion time vs equivalent ratio at different ethanol adding ratios

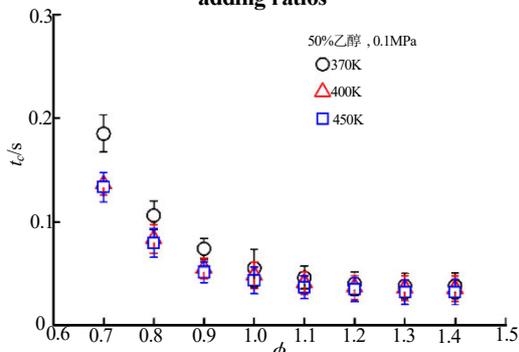


图 14 不同初始温度下爆炸时间随当量比的变化

Fig.14 Explosion time vs equivalent ratio at different initial temperatures

由图 13~14 可以发现,各工况下爆炸时间均随着

当量比增大先降低后略有增加,且均在当量比为 1.2~1.3 时最小。原因在于贫混合物中燃料质量较少,爆炸不太活跃,从而导致爆炸时间较长,而富混合物由于含氧量较少,燃烧反应不剧烈,也导致爆炸时间增长。当初始温度增大时,火焰传播速度加快,使爆炸时间减少。

不同乙醇掺混比例和初始温度下释放热量随当量比的变化如图 15 所示,由图 15 可以看出,相同初始温度下,随着乙醇掺混比例的增大,预混气体释放的热量也增大,在当量比为 1.2 时达到峰值。

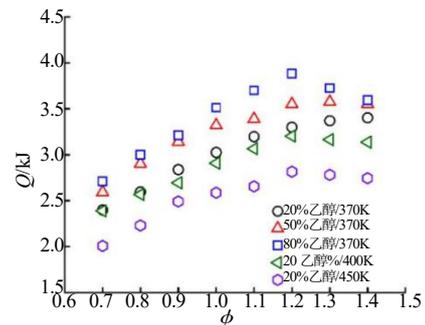


图 15 不同乙醇掺混比例和温度下释放热量随当量比的变化

Fig.15 Heat release vs equivalent ratio under different ethanol adding ratios and initial temperatures

在相同乙醇掺混比例下,温度越高,预混气体释放的热量越少。此外,随着当量比的增大,释放的热量先增大后减少。这主要是由于随着当量比增大,燃料质量增加,燃烧更加剧烈,从而释放热能增大,但由于定容燃烧弹中氧气不足,导致燃烧不完全,造成释放热量减少^[21]。

3 结论

在压力 0.1MPa, 初始温度为 370, 400, 450 K, 乙醇掺混比例为 20%, 50%, 80% 的工况下,研究了 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 预混气体的爆炸特性,对实验数据进行了处理,通过分析爆炸压力峰值、最大爆炸压力上升速率、爆燃指数、爆炸时间、释放热量等爆炸参数,得出以下结论:

- (1) 爆炸压力峰值与初始温度呈线性递减关系。
- (2) 爆炸压力峰值和最大爆炸压力上升速率随当量比的增大都呈现先增大后减小的规律,其峰值出现在当量比为 1.2 或 1.3 处。
- (3) 由于氢气的密度远远小于乙醇的密度,在

高压富氢工况下,混合燃气单位内的可燃气体变少,这使得随乙醇掺混比例上升,可燃预混气体的爆炸压力峰值呈线性上升趋势。

(4)各工况下爆炸时间均随着当量比增大先降低后略有增大,无论初始温度和乙醇掺混比例如何变化,在当量比为1.2~1.3时爆炸时间最小。

(5)相同温度下,随着乙醇掺混比例的增加,预混气体释放的热量也增大,在当量比为1.2时达到峰值。在相同乙醇掺混比例下,温度越高,预混气体释放的热量越少。

参考文献:

- [1] Ren, J., S. Toniolo. Hydrogen for better sustainability[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020,45(59):34 293.
- [2] Wang, L., H. Ma and Z. Shen. Explosion characteristics of hydrogen-air mixtures diluted with inert gases at sub-atmospheric pressures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(40): 22 527-22 536.
- [3] Zhang, Y., et al. Dynamic hazard evaluation of explosion severity for premixed hydrogen-air mixtures in a spherical pressure vessel[J]. Fuel, 2020(261): 116 433.
- [4] Zheng, L., et al. Combined effect of ignition position and equivalence ratio on the characteristics of premixed hydrogen /air deflagrations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018,43(33): 16 430-16 441.
- [5] Mei, Y., et al. Flame propagation of premixed hydrogen-air explosions in bend pipes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022(77): 104 790.
- [6] Li, R., et al. Effect of initial temperature and H₂ addition on explosion characteristics of H₂-poor/CH₄/air mixtures[J]. Energy, 2020(213): 118 979.
- [7] Wang, T., et al. Effects of flammable gases on the explosion characteristics of CH₄ in air[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017(49): 183-190.
- [8] Wang, T., et al. Experimental study on the explosion and flame emission behaviors of methane-ethylene-air mixtures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019(60): 183-194.
- [9] 张嘉玮, 张衍, 姜根柱, 王筱蓉.乙醇-氢气-空气预混燃气爆炸特性的研究[J]. 新能源进展, 2023(2): 189-196.
- [10] 韦双明, 等. 三元混合气体燃料爆炸特性实验研究[J]. 化工学报, 2022,73(1): 451-460.
- [11] Chang, Y.M., et al. Fire and explosion properties examinations of toluene-methanol mixtures approached to the minimum oxygen concentration[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, 96(3): 741-749.
- [12] Oppong, F., et al. Evaluation of explosion characteristics of 2-methylfuran/air mixture[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019(62): 103 954.
- [13] Xu, C., et al. Explosion characteristics of hydrous bio-ethanol in oxygen-enriched air[J]. Fuel, 2020(271): 117 604.
- [14] Su, Y., et al. Effect of nitrogen on deflagration characteristics of hydrogen / methane mixture[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,47(15): 9 156-9 168.
- [15] Oppong, F., et al. Evaluation of explosion characteristics of 2-methylfuran/air mixture[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019(62): 103 954.
- [16] Mitu, M., E. Brandes and W. Hirsch. Mitigation effects on the explosion safety characteristic data of ethanol/air mixtures in closed vessel[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018(117):190-199.
- [17] Li, X., et al. Cellularization characteristics of ethyl acetate spherical expanding flame[J]. Fuel, 2021(291): 120 213.
- [18] Oppong, F., et al. Investigating the explosion of ethyl acetate in the presence of hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020,45(39): 20 400-20 407.
- [19] Oppong, F., et al. Investigations on explosion characteristics of ethyl acetate[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021(70):104 409.
- [20] Sun, Y., et al. Investigation on the explosion limits and flame propagation characteristics of premixed methanol-gasoline blends[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021 (26): 101 000.
- [21] Zhang, L., et al. Influence of pressure and temperature on explosion characteristics of n-hexane/air mixtures[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019(102): 52-60.