

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.03.003

初始压力和富氧系数对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 预混气体爆炸特性的影响*

吉昌泉 贾凡 李斌 张丹 解立峰
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘要] 为了探究甲烷 CH_4 在富氧和非常压条件下的爆炸危险性,确保 CH_4 气体在不同工况下的安全使用,借助 5 L 圆柱形爆炸装置,研究了初始压力 p_0 和富氧系数 E 对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 爆炸特性的影响。包括最大爆炸压力 p_{\max} 、最大压力上升速率 $(dp/dt)_{\max}$ 和最大压力到达时间 t_c 等衡量 CH_4 爆炸安全性的指标。结果表明:当 E 为 0.21、0.25 和 0.30 时, p_{\max} 随 p_0 的增加始终线性上升;而当 E 为 0.35 和 0.40 时, p_{\max} 随 p_0 的增加先缓慢线性上升、后快速线性上升; $(dp/dt)_{\max}$ 随 p_0 的增加分为线性上升和一阶指数快速上升。在 E 为 0.21 和 0.25 时, t_c 随 p_0 的增加而线性增大,因为在燃烧初始阶段 CH_4 活化自由基的销毁速率增加,降低了反应速率和燃速,引起预混气体 t_c 的延长;但随着 E 的增加,氧气的促进作用与自由基销毁的抑制作用形成新的竞争效应,使得 t_c 先增加、后下降。

[关键词] 初始压力;富氧系数;预混气体;爆炸特性;5 L 圆柱形爆炸容器

[分类号] TQ560.7; X932

Effect of Initial Pressure and Oxygen Enrichment Factor on the Explosion Characteristics of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ Premixed Gases

Ji Changquan, Jia Fan, Li Bin, Zhang Dan, Xie Lifeng

School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to investigate the explosion hazards of methane CH_4 under oxygen-rich and non-pressure conditions, and ensure the safe use of CH_4 gas under different operating conditions, the effects of initial pressure p_0 and oxygen enrichment factor E on the explosion characteristics of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ were studied using a 5 L cylindrical explosive device. Indicators such as maximum explosion pressure p_{\max} , maximum pressure rise rate $(dp/dt)_{\max}$, and maximum pressure arrival time t_c were used to measure the explosion safety of CH_4 . The results show that when E is 0.21, 0.25, and 0.30, p_{\max} always increases linearly with the increase of p_0 ; When E is 0.35 and 0.40, p_{\max} first slowly increases linearly with the increase of p_0 , and then rapidly increases linearly; $(dp/dt)_{\max}$ can be divided into linear increase and first-order exponential rapid increase with the increase of p_0 . When E is 0.21 and 0.25, t_c linearly increases with the increase of p_0 , as the destruction rate of CH_4 activated radicals increases during the initial combustion stage, reducing the reaction rate and burning rate, leading to an extension of t_c of premixed gas. But as E increases, the promoting effect of oxygen and the inhibiting effect of free radical destruction form a new competitive effect, causing t_c to increase first and then decrease.

[KEYWORDS] initial pressure; oxygen enrichment factor; premixed gas; explosion characteristics; 5 L cylindrical explosive container

0 引言

现如今,资源节约和环境保护问题已经成为世界各国关注的焦点。尤其在汽车行业,研究人员几

十年来一直在寻找减少汽车污染物排放的有效方法。天然气(NG)储量丰富,且燃烧产生的污染物少,现阶段被认为是传统汽车燃料良好的替代品。研究表明:以NG作为燃料的发动机会出现局部火焰熄灭、燃烧不稳定和输出功率低等问题^[1-3];同时,碳

* 收稿日期:2022-09-06

第一作者:吉昌泉(1998-),男,硕士,主要从事气态爆炸方面的研究。E-mail: jichangquan@njust.edu.cn

通信作者:李斌(1984-),男,博士,副研究员,主要从事多相爆轰相关研究。E-mail: libin@njust.edu.cn

氢化合物(HC)、CO排放量较高,不能满足日益严苛的排放要求。富氧燃烧可以有效提高可燃气体(或可燃蒸气)的燃烧温度,增加传热,减少排烟量,降低可燃物的燃点并加快燃速^[4],从而提高NG的利用率和发动机的输出功率,缩短点火时间并显著降低CO、HC等污染物的排放,但氮氧化物的排放量有所增加^[5-7]。富氧燃烧技术是一种燃烧高于空气中氧气含量的含氧空气的高效节能技术,主要应用在燃料(甲烷 CH_4 、汽油、柴油等)发动机、电站锅炉、热能工程、玻璃、冶金、生物质合成气燃烧等领域^[8-11]。

国内外已经对 CH_4 /空气混合气体在不同初始条件下的燃爆特性和火焰传播特性进行了大量研究。Vanderstraeten等^[12]研究了初始压力和初始温度对 CH_4 /空气混合气体爆炸上限的影响;结果表明,高温下应用切线准则获得的预混气体的爆炸上限较小,而高温、高压下应用最大最小准则确定的爆炸上限与实验结果更匹配。李传家等^[13]在水平激波管中研究了点火能量和初始压力对 CH_4 爆炸强度和火焰传播速度的影响;结果表明,爆炸超压随着初始压力和点火能量的增大而变大,适宜的初始条件可以加速 CH_4 的燃烧转爆轰。蔺伟等^[14]利用长透明管道研究了 CH_4 浓度对火焰传播特征的影响;发现 CH_4 浓度对火焰传播速度和最远传播距离都有显著影响。徐宗^[15]在12.3 mm内径管道中研究了 CH_4 浓度对 CH_4 /空气混合气体爆炸压力的影响;结果表明,随着 CH_4 浓度的增大,爆炸压力呈倒V形变化趋势, CH_4 浓度在当量比时,混合气体爆炸压力最大。郑兴忠等^[16]借助小尺寸瓦斯爆炸实验平台,通过高速摄像机记录 CH_4 爆炸火焰的传播过程,探讨了 CH_4 浓度对燃烧火焰长度的影响。李润之^[17]将理论、实验和数值模拟方法结合,系统研究了初始压力和点火能量对瓦斯爆炸特性的影响,并得出相应的爆炸规律。仇锐来等^[18]在管道中研究了点火能量对 CH_4 /空气混合气体火焰传播速度和最大爆炸压力的影响。

而富氧条件下 CH_4 燃爆特性和火焰传播行为的研究相对较少。Wang等^[19]研究了不同富氧系数 E 和点火位置对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 混合物爆炸特性的影响;结果表明,随着 E 的上升, CH_4 的超压振荡和燃烧引起的快速相变现象更强烈;另外,点火位置对最大压力上升速率的影响更加显著。王发辉等^[20-21]对 CH_4 在富氧条件下火焰传播和泄爆特性进行大量研究;结果表明,随着 E 的增加, CH_4 火焰传播速度急速上升,火焰振荡距离和振幅扩大;另外,泄爆

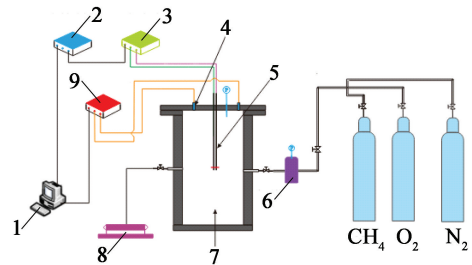
可以大幅降低最大爆炸压力,随着泄爆面积的增大,最大压力到达时间略有缩短。Di Benedetto等^[22]研究了不同 CO_2 含量和 E 下 CH_4 的燃爆行为;实验和模拟结果表明, CO_2 可以有效降低 CH_4 爆炸绝热火焰温度;最后,定量表示了 CO_2 和 E 形成稳定火焰或熄灭火焰的二维平面图。学者们仅仅对常压下相关燃爆特性进行研究,并未对负压和高、低压情况进行深入探讨。但在高海拔地区以及一些突发情况下会出现非常压环境。

为在富氧空气中安全使用 CH_4 燃料,需深入探究 CH_4 在富氧空气中的燃爆特性。 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 混合气体的最大爆炸压力 p_{\max} 、最大压力上升速率 $(dp/dt)_{\max}$ 和最大压力到达时间 t_c 等都是燃烧工艺设备的安全性设计和评估工艺危险性的重要参数。本文中,研究了富氧系数 E 和初始压力 p_0 对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 预混气体爆炸参数的影响。为有效模拟 CH_4 燃料在发动机做功腔室里的工作环境以及 CH_4 意外泄漏在富氧密闭空间,研究在5 L圆柱形爆炸罐中进行。

1 实验系统和条件

1.1 实验系统

可燃气体爆炸特性测试系统主要由5 L圆柱形爆炸容器、配气系统、点火系统、同步控制器与数据采集系统组成,如图1所示。



1-计算机;2-同步控制器;3-点火电源;4-压力传感器;
5-点火电极;6-气体预混装置;7-5 L爆炸容器;
8-真空泵;9-数据采集器。

图1 可燃气体爆炸特性测试系统

Fig. 1 Test system of explosion characteristics of combustible gases

爆炸容器为一个直径160 mm、高250 mm、壁厚20 mm的圆柱形爆炸罐,设计耐压30 MPa。容器上壁和侧壁多个开孔用于安装压电式压力传感器、点火电极以及进气、出气和抽真空管路等。

混合气体的配制。依据气体分压定律向预混储罐中充入 O_2 、 N_2 和 CH_4 3种气体,形成 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 预混气体,使预混储罐达到预定压力400 kPa;装置

静置 10 min,待气体充分混合后,将预混气体充入爆炸容器中,再次静置 10 min。值得注意的是,使用预混储罐可以大幅降低气体混合不均匀引起的偶然误差。实验中,预混储罐和爆炸容器的压力均由高精度防振数显压力表测得,量程 0 ~ 400 kPa,误差 0.1%。爆炸容器内,混合气体通过安装在爆炸容器中心的点火电极进行点火。两个电极深入容器中心,根据 BSEN 1839—2012 标准,采用铬镍合金丝作为点火源。铬镍合金丝功率 600 W,电阻 8 Ω ,连续加热 2 s 释放能量约 225 J(大量实验证明,点火 2 s 实验效果较好)。铬镍合金丝放热能量

$$W = \frac{U^2}{R}t_0 \quad (1)$$

通过调节直流电源电压的大小,可以控制点火能量。另外,释放的能量中,少量散发给预混气体,引起压力略微上升;而大部分作为预混气体点火能量。点火与同步控制器及动态压力数据记录同步进行。爆炸压力测试数据通过安装在爆炸容器上壁的两个压力传感器(美国 PCB 压电公司)获得,压力传感器测量范围 0 ~ 3.4 MPa,灵敏度 5 mV/psi(1 psi = 6.895 kPa),非线性误差可达到 1% 测量范围以内。TraNET 404S8 数据采集器(瑞士 ELSYS 公司)共有 16 个通道,通道采样频率 1 MHz/s。 CH_4 、 O_2 、 N_2 均由南京文达特种气体有限公司提供,纯度均大于 99.9%。

1.2 实验条件

可燃气体在当量比条件下爆炸威力最大^[16]。研究初始压力 p_0 和富氧系数 E 对 CH_4 体积分数 9.5% 的预混气体爆炸参数的影响。

$$E = \frac{\varphi_{\text{O}_2}}{\varphi_{\text{O}_2} + \varphi_{\text{N}_2}} \quad (2)$$

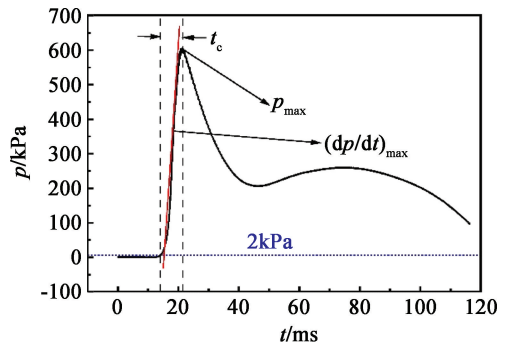
式中: φ_{O_2} 和 φ_{N_2} 分别为预混气体中 O_2 和 N_2 的体积分数。

CH_4 在富氧实际应用环境中包括负压(高海拔)和正压(工业应用),且初始压力较低。因此,富氧系数 E 分别取 0.21、0.25、0.30、0.35 和 0.40;初始压力 p_0 选取 50、80、100、120、150、180 kPa 和 200 kPa。另外,实验中的环境温度为 285 ~ 395 K,大气相对湿度在 50% ~ 90% 之间。

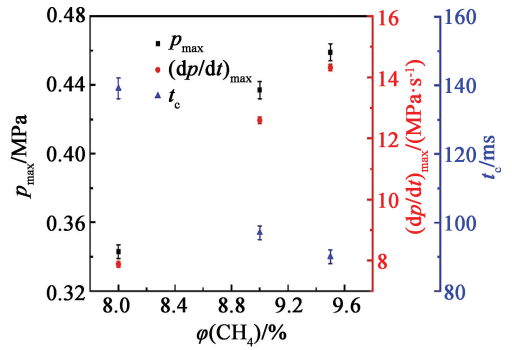
2 实验结果与分析

2.1 不确定性验证(预实验)

图 2(a)为典型的可燃气体爆炸时程曲线。通常,将点火和达到最大爆炸压力的时间间隔定义为



(a) 爆炸参数



(b) 压力参数

图 2 爆炸参数和压力参数的变化

Fig. 2 Changes of explosion parameters and pressure parameters

最大压力到达时间(燃烧时间)^[23]。但由于点火源点燃可燃气体需要时间预热,预热时间比爆炸时间大两个数量级,为了更好地阐述不同条件下的最大压力到达时间的变化规律,将爆炸压力上升超过初始压力 2% 的时间 t_{p1} 与最大爆炸压力时间 t_{pm} 的间隔定义为最大压力到达时间 t_c 。

为了验证实验结果的可靠性,在正式实验前进行预实验。对 CH_4 体积分数分别为 8.0%、9.0% 和 9.5% 的 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 预混气体每组进行 3 次重复实验,结果如图 2(b) 所示。3 个爆炸参数 p_{max} 、 $(dp/dt)_{\text{max}}$ 、 t_c 取平均值,最大误差均小于 4%,说明满足可靠性要求。

2.2 爆炸参数

CH_4 体积分数为 9.5% 时,增大 E ,爆炸参数随 p_0 的变化情况见图 3。

图 3(a)中, $E = 0.21$ 。运用 Origin 软件进行线性拟合,拟合表达式为

$$p_{\text{max}} = A_1 + B_1 p;$$

$$\text{或} \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\text{max}} = A_1 + B_1 p;$$

$$\text{或} t_c = A_1 + B_1 p; \quad (3)$$

表 1 给出了式(3)的相关拟合参数。3 个爆炸

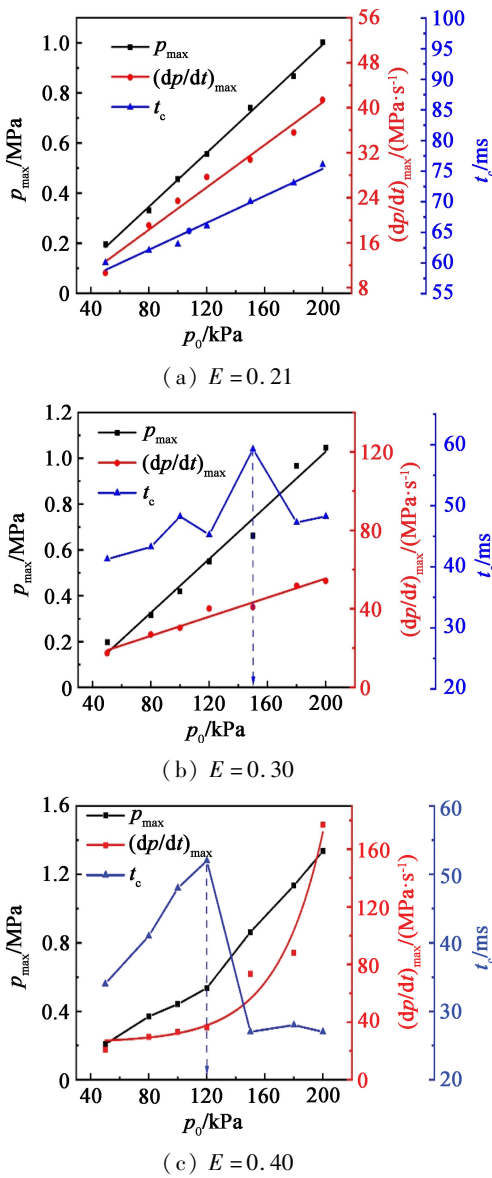
图3 不同 E 时 p_0 对爆炸参数的影响

Fig. 3 Effect of initial pressure on explosion parameters at different oxygen enrichment factors

表1 式(3)拟合参数

Tab. 1 Fitting parameters of Equation (3)

参数	截距 A_1	斜率 B_1	拟合度 R_1^2
p_{\max}	-0.085	0.005 4	0.998
$(dp/dt)_{\max}$	3.217	0.188 7	0.979
t_c	53.304	0.110 1	0.982

参数在式(3)下的拟合度 $R_1^2 \geq 0.97$, 说明3个爆炸参数与 p_0 存在较好的线性关系。此外, 拟合斜率均为正值, 意味着爆炸参数与 p_0 线性正相关。随着 p_0 从50 kPa增加到200 kPa, 预混气体的 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 分别增加了419.2%和290.4%, 而 t_c 增加了26.7%。这是因为在 CH_4 燃烧初期, 火焰绝热温度低, 反应速率小, 燃速慢, p_0 的增大引起了可燃气体

三体碰撞速率加快, 活化自由基销毁速率显著提升, 造成爆炸体系中活化自由基浓度降低, 燃速减小, 从而使得燃烧初期燃烧时间延长。爆炸反应进行到中、后期, 火焰温度升高和反应速率增大, 此时 p_0 升高, 引起爆炸体系有效碰撞增多, 链式反应加快, 使得燃烧时间略有缩短。但整体上, t_c 有所延长。

图3(b)中, $E=0.30$ 。由图3(b)可知, p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 随着 p_0 的增加而增大, 采用式(4)进行线性拟合:

$$p_m = A_2 + B_2 p; \quad (4)$$

$$\text{或} \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} = A_2 + B_2 p_0.$$

表2给了式(4)相关拟合参数。拟合度 $R_2^2 \geq 97\%$, 且斜率为正数, 说明 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 与 p_0 存在较好的线性正相关关系。随着 p_0 从50 kPa增加到200 kPa, 预混气体的 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 分别增加了429.3%和212.4%。与 $E=0.21$ 时不同的是, 此时, t_c 随着 p_0 的增加呈现先上升、后下降的变化规律; 且 $p_0 = 150$ kPa 时, t_c 最大。相较于 $E=0.21$ 时, 取得最大 t_c 的 p_0 向左移, 如图3(b)中虚线箭头所示。随着 p_0 的增加, O_2 对预混气体燃速的促进作用与销毁速率增加引起的抑制作用形成新的竞争效应, 使燃烧时间呈先上升、后下降的变化趋势。

表2 式(4)拟合参数

Tab. 2 Fitting parameters of Equation (4)

参数	截距 A_2	斜率 B_2	拟合度 R_2^2
p_{\max}	-0.142	0.005 9	99.07
$(dp/dt)_{\max}$	6.792	0.243 4	97.23

图3(c)中, $E=0.40$ 。由图3(c)可知, p_{\max} 随着 p_0 的增加而增大, 而 $(dp/dt)_{\max}$ 随着 p_0 的增加呈一阶指数上升关系, 拟合关系式如式(5)所示。

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} = y_0 + A_3 e^{\frac{x-x_0}{t_0}}. \quad (5)$$

表3给出了相关拟合参数。拟合度 $R_3^2 \geq 96\%$, 表明 $(dp/dt)_{\max}$ 与 p_0 存在较好的一阶指数上升关系。随着 p_0 从50 kPa增加到200 kPa, 预混气体的 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 分别增加了542.2%和752.3%。同时, 随着 p_0 的增加, t_c 先上升、后下降, 且取得最大 t_c 的 p_0 继续向左移动, 在 $p_0 = 0.12$ MPa 时取得最

表3 式(5)拟合参数

Tab. 3 Fitting parameters of Equation (5)

参数	x_0	y_0	A_3	t_0	拟合度 R_3^2
$(dp/dt)_{\max}$	59.03	25.99	1.726	31.765	96.60

大 t_c , 如图 3(c) 中虚线箭头所示。

2.2.1 最大爆炸压力 p_{\max}

由图 4 可知, E 不同时, CH_4 的 p_{\max} 均随着 p_0 的增加而变大。这是因为, 随着 p_0 的增加, 密闭空间内气体浓度增大, 气体分子之间的间距被压缩, 分子间的碰撞频率加快, 有效碰撞次数增多, 产生更多的活化分子, 整个体系的传热效率提高、化学反应速度加快, 相比热耗散混合体系, 热释放主导地位程度增强, 引起混合体系 p_{\max} 随 p_0 的增加而变大。结合表 1 ~ 表 2 对 p_{\max} 拟合结果, 从图 4 可以发现, 对于 E 为 0.21、0.25 和 0.30 的工况, p_{\max} 均随着 p_0 的增加线性上升; 而当 E 为 0.35 和 0.40 时, 可以将 p_0 对 p_{\max} 的影响分为线性缓慢上升阶段和线性快速上升阶段, 拐点分别为 $p_0 = 150$ kPa 和 $p_0 = 120$ kPa, 如图 4 中虚线箭头所示。由此可以得出: 在 E 为 0.21、0.25 和 0.30 时, E 对 p_{\max} 的影响较弱; 当 E 为 0.35 和 0.40 时, 随着 p_0 增加到 120 ~ 200 kPa 范围内, E 对 p_{\max} 的影响逐渐显著。如在 E 为 0.35 和 0.40 条件下, 当 $p_0 = 200$ kPa 时, p_{\max} 分别为 1.17 MPa 和 1.34 MPa, 相较于 $p_0 = 120$ kPa 时大幅上升了 119.5% 和 149.3%; 而 $E = 0.21$ 、0.25 和 0.30 条件下, 当 p_0 为 200 kPa, 相较于 120 kPa 时仅仅增加了 80.22%、88.62% 和 93.31%, 增长趋势变缓。这表明, E 需增加到一定阈值时才会对 p_{\max} 产生明显影响。常压下, E 增加到 0.40 时, p_{\max} 仅增加 8.1%, 而文献[21]中增加了 70%; 这是因为文献[21]是在管道中进行, 且点火方式和环境温度等实验条件不同, 造成差异较大。

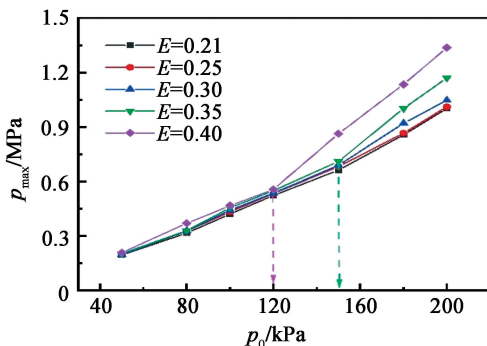


图 4 p_0 和 E 对 p_{\max} 的影响

Fig. 4 Effects of p_0 and E on p_{\max}

2.2.2 最大压力上升速率 $(dp/dt)_{\max}$

图 5 为 p_0 和 E 对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 预混气体最大爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响。使用 Origin 软件对实验数据进行拟合, 根据不同 E 下 $(dp/dt)_{\max}$ 变化的特点, 可分为线性上升和一阶指数上升两种过程, 典型拟合方程见表 1 ~ 表 3。

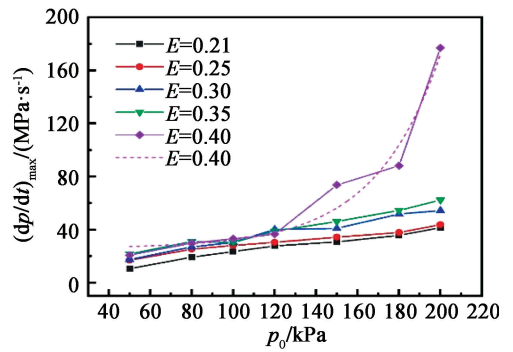


图 5 p_0 和 E 对 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响

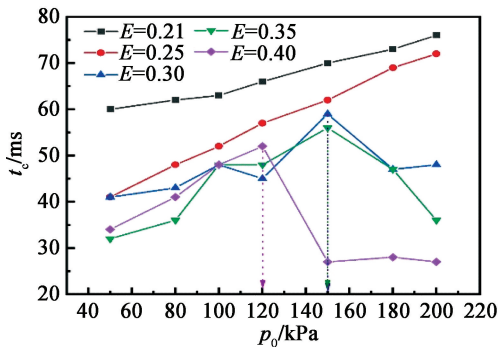
Fig. 5 Effects of p_0 and E on $(dp/dt)_{\max}$

由图 5 可知: 当 E 为 0.21 ~ 0.35 时, 随着 p_0 的增加, $(dp/dt)_{\max}$ 线性上升; 同时, 在一定压力下, E 的促进作用较小。例如, 当 p_0 为 100 kPa 和 200 kPa 时, 相较于 $E = 0.21$, $E = 0.35$ 下的 $(dp/dt)_{\max}$ 分别上升了 31.9% 和 50.4%。但当 E 为 0.40 时, $(dp/dt)_{\max}$ 与 p_0 为一阶指数上升关系, 即在 $p_0 = 200$ kPa 条件下, 相较于 $E = 0.21$ 时, $E = 0.40$ 的 $(dp/dt)_{\max}$ 大幅增加了 327.5%, 表明 $E = 0.40$ 时, $(dp/dt)_{\max}$ 受到 p_0 的强烈影响, CH_4 反应强度显著增加。这是由于在低富氧 ($E = 0.21 \sim 0.35$) 条件下, 氧含量的上升一定程度上增加了可燃气体分子与氧气分子的碰撞概率, 使反应速率加快, 同时降低了氮气浓度, 导致氮气对体系的热量吸收减少, 从而使 $(dp/dt)_{\max}$ 增大。但在高富氧 ($E = 0.40$) 条件下, 氧含量的增加诱发了混合体系燃爆绝热温度的升高, 从而引起燃烧, 诱导快速相变的发生, 造成此时 $(dp/dt)_{\max}$ 随 p_0 的增加而呈一阶指数上升趋势, 从另一个角度也验证了高富氧系数 ($E = 0.35$ 和 0.40) 对 p_{\max} 有促进作用。此外还发现, 相较于 p_{\max} , E 对 $(dp/dt)_{\max}$ 的促进作用更加显著^[22]。

因此, 在 CH_4 的实际富氧应用中, 需控制 E 在 0.21 ~ 0.35 范围内, 在提高燃烧效率的同时, CH_4 的 $(dp/dt)_{\max}$ 较小, 从而有效降低了 CH_4 富氧应用中的爆炸危险性。另外, 由于国内外对于 CH_4 不同 p_0 和 E 下爆炸的研究极少, $E = 0.40$ 时, p_0 在 50 ~ 200 kPa 范围内, CH_4 预混气体的 $(dp/dt)_{\max}$ 呈一阶指数上升, 以及 p_0 大于 200 kPa 时预混气体 $(dp/dt)_{\max}$ 变化情况, 还需进一步探索和完善。

2.2.3 最大压力到达时间 t_c

图 6 为 p_0 和 E 对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 预混气体 t_c 的影响。在不同 E 条件下, t_c 随着 p_0 增加呈现两种变化趋势: t_c 随着 p_0 的增加线性上升 ($E = 0.21 \sim 0.25$) 和先增加、后下降 ($E = 0.30 \sim 0.40$)。Tang 等^[24] 指

图6 p_0 和 E 对 t_c 的影响Fig. 6 Effects of p_0 and E on t_c

出, t_c 与火焰传播速度密切相关, 即火焰传播速度越大, t_c 越短。在低富氧 ($E = 0.21$ 和 0.25) 条件时, 随着 p_0 的增加, $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 混合气体在燃烧初始阶段的分子间碰撞概率增加, 使得活化自由基的销毁概率提升显著, 引起燃烧初始阶段化学反应速率和绝热温度的降低, 造成火焰传播速度急剧减小, 而低富氧对混合体系反应燃速的促进作用有限, 从而 t_c 随着 p_0 的增加而延长。而 p_0 的增加引起活化自由基销毁速率增大, 从内部机理解释来说, 一方面是因为 p_0 的增大促进了基元反应步 R53 和 R158 正向进行, 而这两个基元反应步都消灭了体系中促进 CH_4 燃烧的自由基; 另一方面, 根据刘易斯等^[25] 提出的火焰传播速度和 p_0 的关系可知, 当火焰传播速度小于 50 cm/s 时, 火焰传播速度随压力的升高而降低。在燃烧初期, 较低的火焰温度对气体产生活化自由基的反应影响较小, 而 p_0 升高对自由基销毁速率的影响较为明显, 即反应的活化自由基随着 p_0 的增加而减小。

随着 E 继续增加 ($E = 0.30 \sim 0.40$), 活化自由基的销毁速率和高富氧对混合气体的促进作用形成新的竞争效应, 此时氧气促进作用更加显著, 随着 p_0 的增加, t_c 呈现先增加、后下降的变化规律。并且随着 E 的持续增大, 达到最大 t_c 的 p_0 逐渐向左移动, 在低压下即可达到最大 t_c 。如图 6 中虚线箭头所示。

3 结论

研究了初始压力 p_0 和富氧系数 E 对 CH_4 体积分数为 9.5% 的 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 预混气体的爆炸参数的影响。得到的结果如下:

1) 总体上, p_{\max} 随着 p_0 和 E 的增加而上升。对于 E 为 0.21 、 0.25 和 0.30 的工况, p_{\max} 均随着 p_0 增加线性上升; 而当 E 为 0.35 和 0.40 时, 可以将 p_0

对 p_{\max} 的影响分为两个阶段: 线性缓慢上升阶段和线性快速上升阶段。

2) 不同 E 下 $(dp/dt)_{\max}$ 的变化, 可以分为两种上升过程: 线性上升和一阶指数上升过程。当 $E = 0.21 \sim 0.35$ 时, $(dp/dt)_{\max}$ 随着 p_0 的增加线性上升; 同时, 在一定压力下, E 的促进作用较小。但当 $E = 0.40$ 时, $(dp/dt)_{\max}$ 与 p_0 为一阶指数上升关系。

3) 随着 E 的增加, t_c 随着 p_0 的增加表现出两种变化趋势: 线性上升 (E 为 0.21 和 0.25) 和先增加、后下降 ($E = 0.30 \sim 0.40$)。

参考文献

- [1] BAUER C G, FOREST T W. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. Part I: effect on S. I. engine performance [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2001, 26(1): 55-70.
- [2] DAHOE A E. Laminar burning velocities of hydrogen-air mixtures from closed vessel gas explosions [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(3): 152-166.
- [3] DAHOE A E, ZEVENBERGEN J F, LEMKOWITZ S M, et al. Dust explosions in spherical vessels; the role of flame thickness in the validity of the 'cube-root law' [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9(1): 33-44.
- [4] 杨勇, 张义华, 蔡律律, 等. 富氧燃烧的工业应用进展分析[J]. 能源与节能, 2021(7): 179-181, 205. YANG Y, ZHANG Y H, CAI L L, et al. Analysis on industrial application progress of oxygen enriched combustion [J]. Energy and Energy Conservation, 2021(7): 179-181, 205.
- [5] NABI M N, HUSTAD J E. Effect of fuel oxygen on engine performance and exhaust emissions including ultra-fine particle fueling with diesel-oxygenate blends [C]//SAE 2010 Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. San Diego, CA, US, 2010.
- [6] CHU J W, YAO C L, QIAO G M. Reducing HC emissions of gasoline engine during cold-start by using a oxygen-enriched intake air system [C]//2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Nanjing, 2011: 8422-8425.
- [7] GAO Q, LIU C C, JIN Y A, et al. Emission and combustion misfire of engine with oxygen-enriched in dynamic start process [C]//2009 International Conference on Energy and Environment Technology. IEEE, 2009: 117-120.
- [8] 杜奎林. 浅析富氧燃烧在冶金行业的应用[J]. 冶金与材料, 2018, 38(6): 178-179.

- [9] SALZANO E, BASCO A, CAMMAROTA F, et al. Explosions of syngas-CO₂ mixtures in oxygen-enriched air [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(22): 7671-7678.
- [10] YEPES H A, AMELL A A. Laminar burning velocity with oxygen-enriched air of syngas produced from biomass gasification [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(18): 7519-7527.
- [11] 郑楚光, 赵永椿, 郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(23): 3856-3863.
ZHENG C G, ZHAO Y C, GUO X. Research and development of oxy-fuel combustion in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(23): 3856-3863.
- [12] VANDERSTRAETEN B, TUERLINCKX D, BERGHMANS J, et al. Experimental study of the pressure and temperature dependence on the upper flammability limit of methane-air mixtures [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1997, 56(3): 237-246.
- [13] 李传家, 王伯良, 黄菊, 等. 爆炸形成过程中火焰加速的试验研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(10): 76-81.
LI C J, WANG B L, HUANG J, et al. Experimental study on flame acceleration in the forming process of explosion [J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(10): 76-81.
- [14] 蔺伟, 回岩, 王成, 等. 瓦斯体积分数对火焰传播规律影响的实验研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(6): 551-555.
LIN W, HUI Y, WANG C, et al. Experimental investigation about the influence of gas concentration on flame propagation [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(6): 551-555.
- [15] 徐宗. 小型管道内气体燃烧火焰传播规律研究 [D]. 太原: 中北大学, 2011.
XU Z. Research on gas flame propagation in small size pipe [D]. Taiyuan: North University of China, 2011.
- [16] 郑兴忠, 郑丹. 甲烷浓度和点火能量对瓦斯爆炸火焰长度影响的实验研究 [J]. *消防技术与产品信息*, 2015(3): 12-15.
- [17] 李润之. 点火能量与初始压力对瓦斯爆炸特性的影响研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2010.
LI R Z. Study on the influence of ignition energy and initial pressure on the gas explosion characteristics [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [18] 仇锐来, 张延松, 司荣军, 等. 点火能量对瓦斯爆炸传播影响的实验研究 [J]. *矿业安全与环保*, 2011, 38(1): 6-9.
QIU R L, ZHANG Y S, SI R J, et al. Experimental study on influence of ignition energy upon gas explosion propagation [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2011, 38(1): 6-9.
- [19] WANG F H, CHEN J N, WEN X P, et al. Experimental study on the explosion characteristics of CH₄/O₂/N₂ mixtures with different oxygen enrichment coefficients and ignition positions [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(47): 30495-30501.
- [20] 王发辉, 陈京宁, 温小萍, 等. 富氧条件下甲烷爆燃火焰传播特性试验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(1): 167-173.
WANG F H, CHEN J N, WEN X P, et al. Experimental study on flame propagation characteristics of methane deflagration under the oxygen-enriched condition [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(1): 167-173.
- [21] 王发辉, 孙悦, 温小萍, 等. 富氧条件下不同泄爆面积对 CH₄ 燃烧诱导快速相变的影响 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(1): 109-116.
WANG F H, SUN Y, WEN X P, et al. Impact of the different venting areas on the combustion induced rapid phase transition (CRPT) by CH₄/N₂/O₂-enriched mixture [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(1): 109-116.
- [22] DI BENEDETTO A, DI SARLIA V, SALZANO E, et al. Explosion behavior of CH₄/O₂/N₂/CO₂ and H₂/O₂/N₂/CO₂ mixtures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34: 6970-6978.
- [23] DI BENEDETTO A, CAMMAROTA F, DI SARLIA V, et al. Anomalous behavior during explosions of CH₄ in oxygen-enriched air [J]. *Combustion & Flame*, 2011, 158(11): 2214-2219.
- [24] TANG C L, HUANG Z H, JIN C, 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.
- [25] 伯纳德·刘易斯, 京特·冯·埃尔贝. 燃气燃烧与瓦斯爆炸 [M]. 王方, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.