

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0352

# 多因素耦合作用对甲烷爆炸特性的影响\*

刘可心<sup>1</sup>, 刘 炜<sup>1</sup>, 孙亚松<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学动力与能源学院, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学太仓长三角研究院计算物理与能源科学中心, 江苏 太仓 215400)

**摘要:** 为了探究多因素耦合作用对甲烷爆炸特性的影响, 采用 1.2 L 圆柱形爆炸装置, 结合自主设计和搭建的可燃气体爆炸试验平台, 从最大爆炸压力的角度分析了不同当量比  $\varphi$  (0.6~1.4)、初始温度  $T_0$  (25~200 °C) 和初始压力  $p_0$  (0.1~0.5 MPa) 耦合条件对甲烷爆炸特性的影响规律。在此基础上, 基于实验获得的最大爆炸压力数据, 利用 1stOpt 构建了甲烷最大爆炸压力与当量比、初始温度和初始压力的非线性回归预测模型。结果表明: 在初始温度和初始压力耦合作用下, 初始压力越高, 初始温度对最大爆炸压力的影响越大; 初始温度越高, 初始压力对最大爆炸压力的影响越小。在初始压力和当量比耦合作用下, 在研究的实验条件范围内, 当  $\varphi < 0.9$  或  $\varphi > 1.2$  时, 初始压力越高, 最大爆炸压力的变化越显著。在初始温度和当量比耦合作用下, 在实验条件范围内, 当  $\varphi > 1.15$  时, 初始温度越高, 最大爆炸压力的变化越显著。此外, 通过将基于 1stOpt 预测模型的预测结果与实验测试结果相比较, 发现二者之间的相对误差均小于 10%, 表明该预测模型具有较高的精度和适应性。

**关键词:** 最大爆炸压力; 耦合作用; 甲烷-空气混合物; 预测模型

中图分类号: O389; X932 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Influence of multi-factor coupling on methane explosion characteristics

LIU Kexin<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, SUN Yasong<sup>1,2</sup>

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Center of Computational Physics and Energy Science, Yangtze River Delta Research Institute of NWPU, Northwestern Polytechnical University, Taicang 215400, Jiangsu, China)

**Abstract:** To investigate the influence of multi-factor coupling on the explosion characteristics of methane, an explosive gas test platform with a 1.2 L cylindrical explosive device was designed and established. From the perspective of the maximum explosion pressure, the effects of different equivalence ratios  $\varphi$  (0.6–1.4), initial temperatures  $T_0$  (25–200 °C) and initial pressures  $p_0$  (0.1–0.5 MPa) on methane explosion characteristics were comprehensively analyzed. Based on the maximum explosion pressure data by the experiments, a nonlinear regression prediction model among the maximum explosion pressure of methane, equivalence ratio, initial temperature and initial pressure was developed by the 1stOpt software. The results show that: under the coupling effect of the initial temperature and initial pressure, the higher the initial pressure, the more the significant effect of the initial temperature on the maximum explosion pressure. However, with the increasing of the initial temperature, the effect of initial pressure on the maximum explosion pressure is weakened. Under the coupling effect of the initial pressure and equivalence ratio, and within the experimental conditions of the study, when  $\varphi < 0.9$  or  $\varphi > 1.2$ , the higher the initial pressure, the more dramatically on the maximum explosion pressure changes. Under the coupling effect of initial temperature and equivalence ratio, and within the experimental conditions of the study, when  $\varphi > 1.15$ , the higher the initial temperature, the more significantly the maximum explosion pressure changes. In addition, comparing the prediction results of

\* 收稿日期: 2022-08-10; 修回日期: 2022-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(51976173); 江苏省自然科学基金(BK20201204); 霍英东青年教师基金(161052)

第一作者: 刘可心(1996—), 男, 博士研究生, liukexin0825@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 孙亚松(1986—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, yssun@nwpu.edu.cn

the 1stOpt prediction model with the experimental results, the relative error is less than 10%. It is indicated that the prediction model can provide high accuracy and good adaptability.

**Keywords:** maximum explosion pressure; coupling effect; methane-air mixture; prediction model

天然气作为清洁高效的低碳化石能源,是中国在 2060 年实现碳中和目标的重要过渡燃料<sup>[1-2]</sup>。中国天然气储量丰富且市场需求巨大,中国国家能源局预计在 2030 年中国的天然气消费规模将达到 5 500~6 000 亿立方米<sup>[3]</sup>。然而,天然气在生产、运输和储存等环节都存在潜在的爆炸风险,可能对人们的生命和财产安全造成严重威胁。此外,基于天然气优良的理化特性以及日趋成熟的相关配套技术,天然气在内燃机和发电机等设备中的应用越来越广泛,天然气在这些复杂应用场景下的高效利用和安全性也越来越受到人们的关注。在天然气的诸多成分中,甲烷气体含量最高且爆炸风险最大<sup>[4]</sup>。因此,开展甲烷爆炸特性的研究对于天然气的安全高效利用和爆炸防控具有重要意义。

在可燃气体爆炸特性的研究中,当量比  $\varphi$ 、温度  $T_0$  和压力  $p_0$  等初始条件是影响爆炸特性的重要因素<sup>[5-7]</sup>。在当量比因素研究方面,余明高等<sup>[8]</sup>研究了室温下不同甲烷体积分数的甲烷-空气混合物在管道内的爆炸特性,得出甲烷体积分数为 9.5% 时,即化学当量比条件下,甲烷的最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率最大,且峰值出现的时间最早;王文涛等<sup>[9]</sup>探究了常温常压下不同当量比对于乙炔-空气爆炸特性的影响,研究发现随着当量比增大,最大爆炸压力先升高后下降,在当量比为 1.32 时达到峰值;Tran 等<sup>[10]</sup>利用 ANSYS Fluent 软件,对于合成气-空气混合物在不同当量比(0.8~3.0)下的爆炸行为进行了数值模拟研究。在压力因素研究方面,王华等<sup>[11]</sup>采用 20 L 近球型爆炸反应器,分析了不同初始压力对于可燃性气体爆炸特性的影响,研究表明初始压力对于最大爆炸压力和最大压力上升速率具有促进作用,会导致爆炸危险性增强;Huang 等<sup>[12]</sup>使用 645 mL 的圆柱形容器,在室温高压条件下进行了甲烷-空气混合物的爆炸实验;Cui 等<sup>[13]</sup>测量了甲烷-空气混合物在低温(123~273 K)和高压(0.1~0.9 MPa)条件下的可燃极限,得到了温度和压力对于可燃极限的影响规律。在温度因素研究方面,高娜等<sup>[14]</sup>研究了常压下初始温度对甲烷-空气混合物爆炸压力的影响,揭示了初始温度对于最大爆炸压力的抑制作用;Cammarota 等<sup>[15]</sup>研究了化学当量条件下甲烷-空气混合物的爆炸特性,发现初始温度的增加对燃烧速度具有促进作用,进而提高了最大压力上升速率和爆燃指数  $K_G$ ;李润之等<sup>[16]</sup>基于流场模拟平台,利用数值模拟手段深入剖析了低温环境条件下甲烷的爆炸过程。此外,容器尺寸<sup>[17]</sup>、障碍物<sup>[18-19]</sup>、湍流<sup>[20]</sup>等因素也会对甲烷的爆炸特性产生影响。

综上所述,目前针对爆炸特性方面的研究主要集中在单因素分析上,温度和压力条件也多为常温常压或者单一的高温或高压,且当量比大多数为 1.0,对于复杂工况如高温高压、高温富燃料等情况下的爆炸特性研究较少。但在实际工程应用中,可燃气体的爆炸特性往往会受到多种因素的耦合作用。以天然气内燃机为例,其反应过程涉及到不同的当量比、温度以及压力耦合条件。然而,目前关于多因素耦合作用对甲烷爆炸特性影响的研究鲜有报道,并且对于复杂条件下各因素间的相互作用关系也缺乏深入了解。值得注意的是,发动机的整体环境性能和技术经济性能是建立在具有较高耐爆性能基础上的<sup>[21]</sup>,因此研究多因素耦合条件下甲烷的爆炸特性对于天然气内燃机以及天然气发电机等设备的防爆设计和安全应用是至关重要的<sup>[22]</sup>。

最大爆炸压力  $p_{\max}$  是评价爆炸特性的关键参数,能够最直观地反映爆炸的危险程度<sup>[23]</sup>。基于此,本文选取  $p_{\max}$  作为切入点,探究初始温度  $T_0$  和初始压力  $p_0$  耦合、初始压力  $p_0$  和当量比  $\varphi$  耦合以及初始温度  $T_0$  和当量比  $\varphi$  耦合 3 种条件对于甲烷爆炸特性的影响,并建立  $p_{\max}$  的三因素回归预测模型,得到  $p_{\max}$  与  $\varphi$ 、 $T_0$  和  $p_0$  之间的数学关系,以期实现对于复杂条件下甲烷爆炸特性的预测,为甲烷反应容器的强度设计和安全距离预留提供数据参考。

## 1 实验系统与方法

### 1.1 实验装置

实验装置由配气系统、加热系统、点火系统和数据采集系统等组成,装置示意图如图 1 所示。本实验

采用立式不锈钢圆柱作为爆炸容器, 容器的直径为 80 mm, 高度为 243 mm, 极限承压为 10 MPa。配气系统包括真空泵和高压气瓶, 其中甲烷纯度为 99.99%, 配气可通过电磁阀实现自动控制, 精度为 0.1%。加热系统通过缠绕在容器周围的电阻丝进行加热, 通过 PID 系统实现温度调控。采用四线制铂电阻 PT100 作为温度传感器进行测温, 最大量程为 350 °C, 温度的稳定性和均匀性均优于  $\pm 2$  °C。点火系统采用电火花放电, 使用电压为 15 kV、最大通过电流为 30 mA 的变压器作为点火电源, 点火能量约为 10 J, 点火时间 0.4 s。点火电极由 2 个直径为 1 mm 的不锈钢制成, 间距 3 mm, 置于容器几何中心处。数据采集系统由 PCB 高频压力传感器和计算机组成, 压力传感器置于爆炸容器顶部, 最大量程为 5 MPa, 精度为 0.1%。

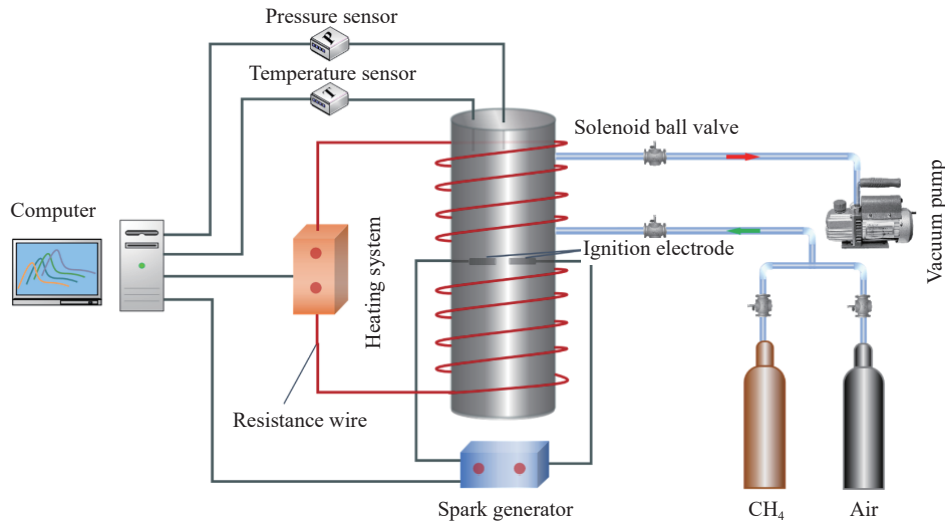


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

## 1.2 实验方法

当量比定义如下:

$$\varphi = \frac{F/A}{(F/A)_{st}} \quad (1)$$

式中:  $(F/A)_{st}$  为化学计量比下的甲烷与空气体积分数之比;  $F/A$  为实际的甲烷与空气体积分数之比。

本文将  $\varphi$  设置为 0.6、0.8、1.0、1.2 和 1.4, 对应的甲烷体积分数分别为 5.93%、7.75%、9.50%、11.19% 和 12.81%, 其中  $\varphi=1.0$  为化学当量比。另外, 选取 25、50、100、150 和 200 °C 作为初始温度  $T_0$ , 选取 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 MPa 作为初始压力  $p_0$ 。

在实验开始前, 首先检查装置气密性, 以保证气密性良好。通过加热系统将爆炸容器的温度升高至预设的实验温度。然后, 使用真空泵将爆炸容器抽真空至  $-0.1$  MPa, 采用道尔顿分压法按照预定比例对混合气体进行配置。为确保点火前甲烷/空气混合物在爆炸容器中处于静止平衡状态, 混合气体在容器中至少停留 10 min。点火完成后, 压力传感器采集的动态压力数据由计算机进行处理, 最后得到甲烷的爆炸压力-时间曲线和  $p_{max}$ 。每次实验结束后, 连续抽真空 3 次, 清除容器内的所有废气。为保证实验的可重复性和准确性, 每个工况至少进行 3 次重复测试。

## 2 双因素耦合条件下甲烷爆炸特性分析

### 2.1 初始温度和初始压力耦合

图 2 展示了  $\varphi=1.0$  时, 在  $T_0$  和  $p_0$  的影响下,  $p_{max}$  的变化情况。从图 2(a) 可以看出,  $p_{max}$  与  $p_0$  呈正比。从斜率来看,  $T_0$  升高,  $p_{max}$  随  $p_0$  的增长速度逐渐降低。当  $p_0$  升高时, 升温对于  $p_{max}$  的抑制作用会被强

化。这是由于温度越高, 混合气中的甲烷分子数目越少。同时与低压相比, 在高压情况下混合气中的空气分子数目大幅增加, 空气的惰化效应会加强高温对于  $p_{\max}$  的抑制效果<sup>[24]</sup>。由图 2(b) 可知,  $p_{\max}$  与  $T_0$  呈反比, 变化趋势基本相同。从斜率来看,  $p_0$  越高,  $p_{\max}$  随  $T_0$  的下降速度越快。当  $T_0$  升高时, 升压对于  $p_{\max}$  的促进作用会被削弱。造成这种现象的原因是随着温度的升高, 混合气中的甲烷分子数目和氧气分子数目均逐渐减少, 甲烷分子与氧气分子发生有效碰撞的概率随之降低<sup>[25]</sup>, 从而削弱了高压对于  $p_{\max}$  的促进效果。

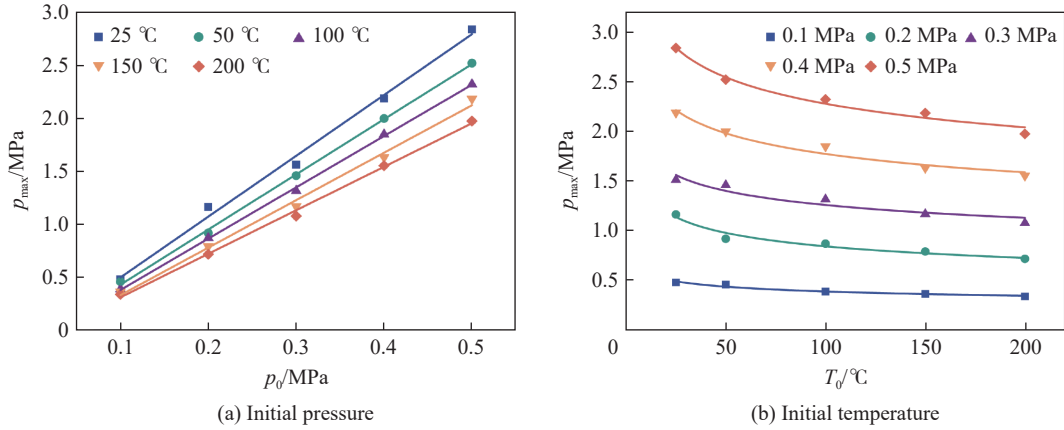


图 2  $T_0$  和  $p_0$  对  $p_{\max}$  的影响

Fig. 2 Effect of  $T_0$  and  $p_0$  on  $p_{\max}$

如图 3 所示, 为了更直观地体现  $T_0$  和  $p_0$  对  $p_{\max}$  的耦合影响, 通过拟合得到  $p_{\max}$  随  $T_0$  和  $p_0$  变化的三维非线性曲面。从图中可以看出, 在常温高压(25 °C、0.5 MPa)情况下甲烷的  $p_{\max}$  最高, 在高温常压(200 °C、0.1 MPa)情况下甲烷的  $p_{\max}$  最低, 所以在生产实际中需注意常压高温情况下甲烷的防爆安全问题。

为了定量评估  $T_0$  和  $p_0$  耦合作用对于  $p_{\max}$  的影响, 利用 Origin 软件得到如下拟合函数:

$$p_{\max} = z_0 + Ap_0 + BT_0 + Cp_0^2 + DT_0^2 + Fp_0T_0 \quad (2)$$

式中:  $z_0$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $F$  为拟合系数, 具体数值见表 1。从表 1 可以看出, 在不同  $\phi$  条件下, 决定系数  $R^2$  均大于 0.99, 具有较好的拟合效果。利用式 (2) 可预估在实验温度和压力范围内 ( $25\text{ °C} \leq T_0 \leq 200\text{ °C}$ ,  $0.1\text{ MPa} \leq p_0 \leq 0.5\text{ MPa}$ ), 不同  $\phi$  条件下甲烷的  $p_{\max}$ 。

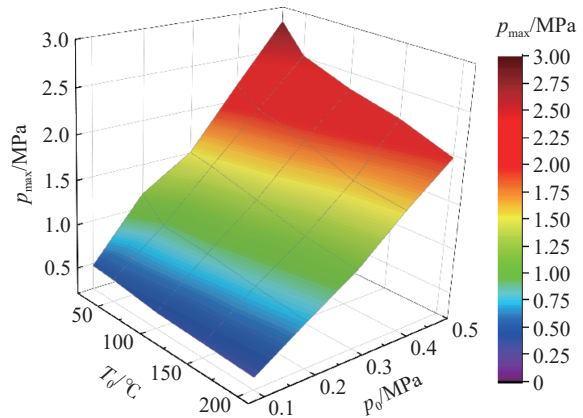


图 3  $T_0$  和  $p_0$  对  $p_{\max}$  耦合影响

Fig. 3 Coupling effects of  $T_0$  and  $p_0$  on  $p_{\max}$

表 1 拟合函数的各项参数

Table 1 The parameters of the fitting function

$\phi$	$z_0$	$A$	$B$	$C$	$D$	$F$	$R^2$
0.6	-0.219 63	3.175 84	$3.84 \times 10^{-3}$	0.121 76	$-1.57 \times 10^{-5}$	$1.74 \times 10^{-4}$	0.993 46
0.8	0.012 74	4.903 38	$-9.80 \times 10^{-4}$	0.542 77	$3.64 \times 10^{-6}$	$-7.00 \times 10^{-3}$	0.997 91
1.0	0.083 44	4.944 25	$-2.20 \times 10^{-3}$	1.417 31	$9.35 \times 10^{-6}$	$-8.69 \times 10^{-3}$	0.995 00
1.2	0.037 01	5.772 23	$-2.54 \times 10^{-3}$	0.464 03	$1.06 \times 10^{-5}$	$-8.61 \times 10^{-3}$	0.995 42
1.4	-0.053 28	5.016 48	$-2.43 \times 10^{-4}$	1.521 04	$2.33 \times 10^{-6}$	$-8.38 \times 10^{-3}$	0.997 35

### 2.2 初始压力和当量比耦合

为了定量评估  $p_0$  和  $\varphi$  的耦合作用对于  $p_{\max}$  的影响, 现定义如下参数:

$p_{\max}$  差值为:

$$\Delta p'_{13} = p'_1 - p'_3, \quad \Delta p'_{23} = p'_2 - p'_3$$

$p_{\max}$  变化率为:

$$a_{13} = \Delta p'_{13} / \Delta p_{13}, \quad a_{23} = \Delta p'_{23} / \Delta p_{23}$$

$p_{\max}$  变化率的比值为:

$$S_a = a_{23} / a_{13}$$

式中:  $p'_1$ 、 $p'_2$ 、 $p'_3$  分别为  $T_0=100$  °C 时,  $p_0$  取值分别为  $p_1=0.1$  MPa、 $p_2=0.2$  MPa 和  $p_3=0.3$  MPa 对应的  $p_{\max}$  值;  $\Delta p_{13} = p_1 - p_3$ ,  $\Delta p_{23} = p_2 - p_3$ 。

图 4 展示了  $T_0=100$  °C 时, 在  $p_0$  和  $\varphi$  影响下,  $p_{\max}$  的变化情况。结合图 4(a) 和图 4(b) 不难发现, 在  $\varphi=1.2$  时,  $p_{\max}$  达到峰值且随  $p_0$  的增长速度最快。这说明在  $\varphi=1.2$  时, 甲烷的爆炸反应最充分, 危险程度最高。出现这种现象的原因是: 化学反应具有不完全性, 并且燃烧产物也会发生解离及二次反应, 因此气体的最佳爆炸当量比一般会大于化学计量比, 且为化学计量比的 1.1~1.5 倍<sup>[26]</sup>。

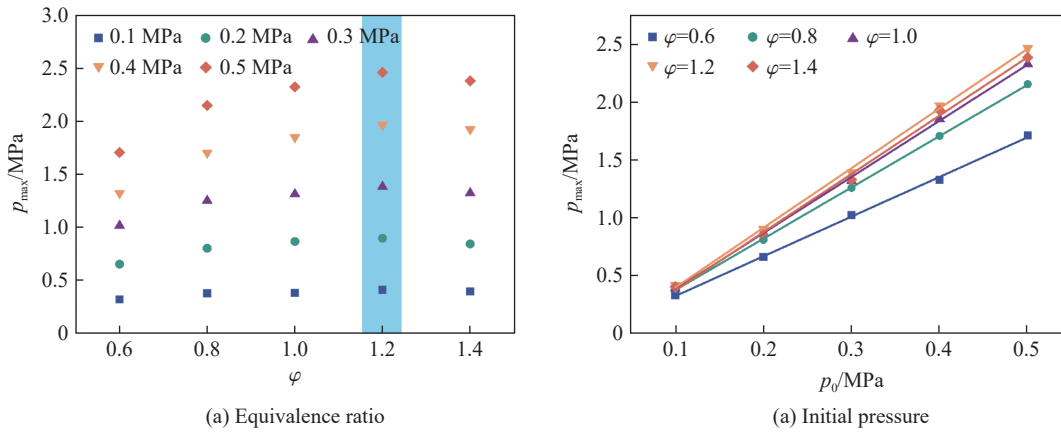


图 4  $p_0$ 、 $\varphi$  对  $p_{\max}$  的影响

Fig. 4 Effect of  $p_0$  and  $\varphi$  on  $p_{\max}$

为了探究不同  $\varphi$  条件下,  $p_0$  的变化对于  $p_{\max}$  的影响规律, 通过计算得出的  $a_{13}$ 、 $a_{23}$  和  $S_a$  随  $\varphi$  的变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出:  $a_{13}$  和  $a_{23}$  随  $\varphi$  的变化规律较一致, 均为先升高后降低, 且峰值均出现在  $\varphi=1.2$  处。  $S_a$  随  $\varphi$  先减小后增大, 当  $\varphi=1.0$  时,  $S_a$  达到最小值, 表明此时  $p_0$  的变化对于  $p_{\max}$  的影响最小; 当  $\varphi=0.9$  或  $1.2$  时,  $a_{13}$ 、 $a_{23}$  相同且  $S_a$  为 1, 说明  $p_0$  的变化对  $p_{\max}$  的影响呈线性变化; 当  $0.9 < \varphi < 1.2$  时,  $S_a < 1$ , 表明低压环境对  $p_{\max}$  的影响更大; 当  $\varphi < 0.9$  或  $\varphi > 1.2$  时,  $S_a > 1$ , 说明对于较稀可燃混合气和较浓可燃混合气, 高压环境对  $p_{\max}$  的影响更大。

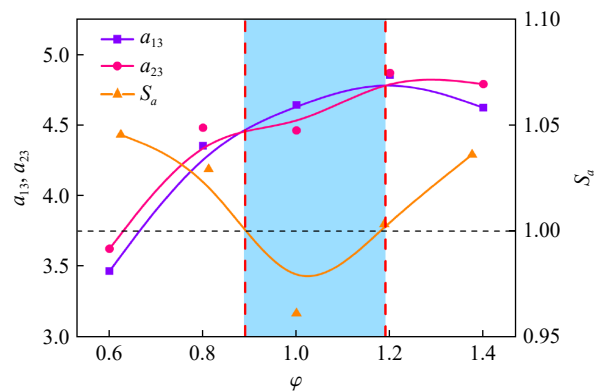


图 5  $a_{13}$ 、 $a_{23}$  和  $S_a$  随  $\varphi$  的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of  $a_{13}$ 、 $a_{23}$  and  $S_a$  with  $\varphi$

### 2.3 初始温度和当量比耦合

在研究  $T_0$  和  $\varphi$  对于  $p_{\max}$  的耦合影响时, 研究对象选择  $p_0=0.5$  MPa,  $T_0=25, 50$  和  $100$  °C 时对应的

$p_{\max}$ , 参数定义方法与前文类似, 此处不再赘述, 其中  $p_{\max}$  变化率和  $p_{\max}$  变化率的比值分别用  $b_{13}$ 、 $b_{23}$  和  $S_b$  表示。

图 6 展示了  $p_0=0.5$  MPa 时, 在  $T_0$  和  $\varphi$  影响下, 甲烷-空气混合物  $p_{\max}$  的变化情况。如图 6(a) 所示, 在不同  $T_0$  下,  $p_{\max}$  均在  $\varphi=1.2$  处达到最大, 这与上文提到的原因一致。观察图 6(b) 可见, 当  $\varphi=0.6$  时, 随着  $T_0$  升高,  $p_{\max}$  先上升后下降, 在 100 °C 时达到峰值, 而其他  $\varphi$  条件下  $p_{\max}$  均单调递减。这可能是因为: 温度对于爆炸的影响体现在两个方面, 一方面温度的升高会加快分子的运动速率, 提高分子间的碰撞频率; 另一方面温度的升高会减少分子的数目, 降低分子间的碰撞频率。受这两方面的共同影响, 当  $T_0 < 100$  °C 时, 温度对于爆炸的促进作用要强于抑制作用; 当  $T_0 > 100$  °C 时则正好相反。具体影响机理需要通过爆炸模拟等手段进一步探究。

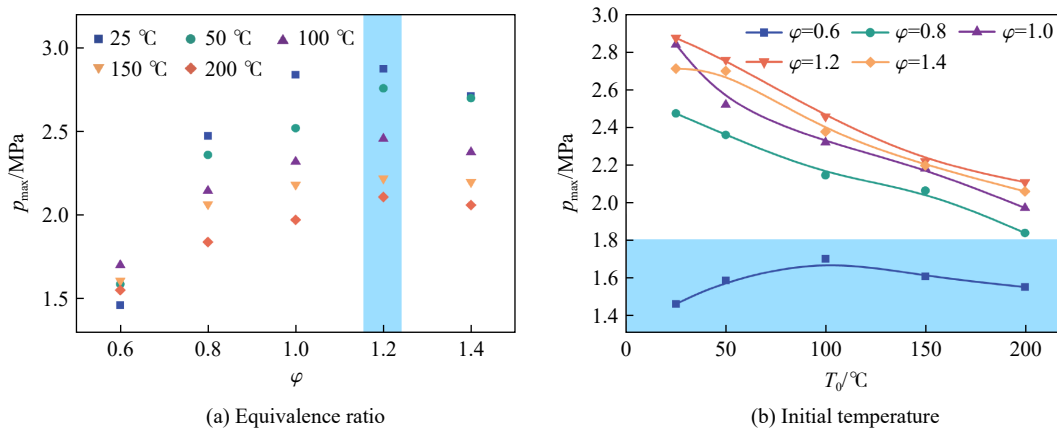


图 6  $T_0$ 、 $\varphi$  对  $p_{\max}$  的影响

Fig. 6 Effects of  $T_0$  and  $\varphi$  on  $p_{\max}$

为了探究不同  $\varphi$  条件下,  $T_0$  的变化对于  $p_{\max}$  的影响规律, 通过计算得出的  $b_{13}$ 、 $b_{23}$  和  $S_b$  随  $\varphi$  的变化曲线如图 7 所示。从图中可以看出:  $b_{13}$  和  $b_{23}$  随  $\varphi$  的变化规律有所差异,  $b_{13}$  先增加后减小, 而  $b_{23}$  单调递增。  $S_b$  随  $\varphi$  先增大后减小再增大, 在  $\varphi=1.0$  时,  $S_b$  达到最小值, 表明此时  $T_0$  的变化对于  $p_{\max}$  的影响最小; 当  $\varphi=1.15$  时,  $b_{13}$ 、 $b_{23}$  相同即  $S_b=1$ , 表明  $T_0$  的变化对  $p_{\max}$  的影响呈线性变化; 当  $\varphi < 1.15$  时,  $S_b < 1$ , 表明  $T_0$  越低,  $p_{\max}$  的变化越显著; 当  $\varphi > 1.15$  时,  $S_b > 1$ , 表明  $T_0$  越高,  $p_{\max}$  的变化越显著。另外, 当  $\varphi > 1.0$  时,  $S_b$  急剧上升, 表明富燃料状态下  $p_{\max}$  变化加剧。

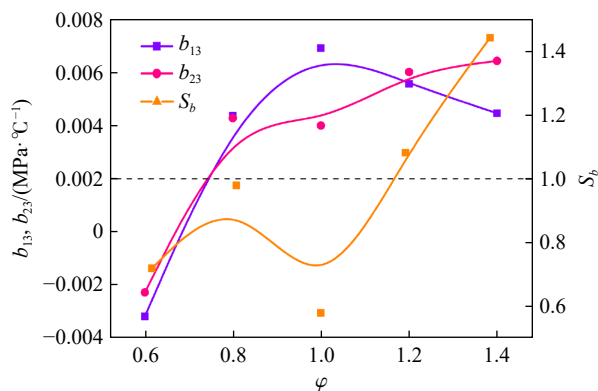


图 7  $b_{13}$ 、 $b_{23}$  和  $S_b$  随  $\varphi$  的变化

Fig. 7 Variation of  $b_{13}$ 、 $b_{23}$  and  $S_b$  with  $\varphi$

### 3 三因素耦合条件下 $p_{\max}$ 预测模型的建立与验证

#### 3.1 预测模型的建立

1stOpt 是一款数值优化分析计算软件, 具有超强的寻优、容错能力, 在非线形回归、曲线拟合等领域得到了广泛应用<sup>[27]</sup>。为了得到  $p_{\max}$  的预测模型, 利用 1stOpt 中的 Levenberg-Marquardt 算法+通用全局优化算法对实验数据进行快速拟合, 并将决定系数  $R^2$  和均方根误差  $\xi$  作为评价模型拟合效果的基本指标, 其中  $R^2$  能够反映模型的拟合优度, 均方根误差能够反映模型的预测偏差。具体的计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{3}$$

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \tag{4}$$

式中:  $n$  为数据样本数目,  $x_i$  为任意变量  $x$  的实测值,  $\hat{x}_i$  为  $x$  的预测值,  $\bar{x}$  为  $x$  的平均值。

利用实验所得的 125 组数据建立  $p_{\max}$  预测样本集, 将样本集与 1stOpt 软件内置拟合库中的函数进行逐一拟合, 并得到相应的基本评价指标。表 2 为筛选出的一部分拟合效果较好的公式(其中压力单位为 MPa)。通过对比可以看出: 式 (1) 的  $R^2$  大于 0.99 且预测偏差最小, 说明选择该公式作为预测模型是合理可靠的, 最能体现  $p_{\max}$  与各参数之间的关系。

表 2 不同公式拟合条件下的评价指标对比

Table 2 Comparison of evaluation indicators under different formula fitting conditions

序号	公式	$R^2$	$\xi$
1	$p_{\max} = (0.0772 + \varphi)^2 \left[ \frac{10\,000 + 11\,864.817p_0 + 7.992T_0 + 8\,083.171\varphi}{659.786 - 179.164p_0 + 0.536T_0 + 541.349\varphi} - (3.882 + p_0)^2 \right]$	0.9927	0.08434
2	$p_{\max} = p_0 - 0.827 + \frac{248.495p_0 - 0.162T_0 - 89.858\varphi}{126.022 - 35.188p_0 + 0.452T_0 - 53.084\varphi} + 2.351\varphi$	0.98623	0.11560
3	$p_{\max} = (\varphi + 3.309) \left( p_0 + \frac{1.430}{T_0} \right)$	0.96536	0.18361
4	$p_{\max} = -0.428 + 4.568p_0 - 0.00192T_0 + 0.0192\varphi$	0.96489	0.20642
5	$p_{\max} = p_0^{1.103} \left( 4.621\varphi + \frac{1}{198.124 - T_0} \right)$	0.92045	0.29428

### 3.2 预测模型的验证

图 8 为  $p_{\max}$  模型预测值与实验测试值的拟合结果。从图 8(a) 中可以看出: 前 25 组数据拟合效果较差, 这是因为  $\varphi=0.6$  时  $p_{\max}$  的变化规律与  $\varphi$  取其他值时有所差异导致的。在  $\varphi$  取其他值时, 预测值与实测值均拟合良好, 并且随着  $\varphi$  的增加, 预测模型的拟合更加精确, 这表明该预测模型较为可信, 且更加适用于高当量比条件。

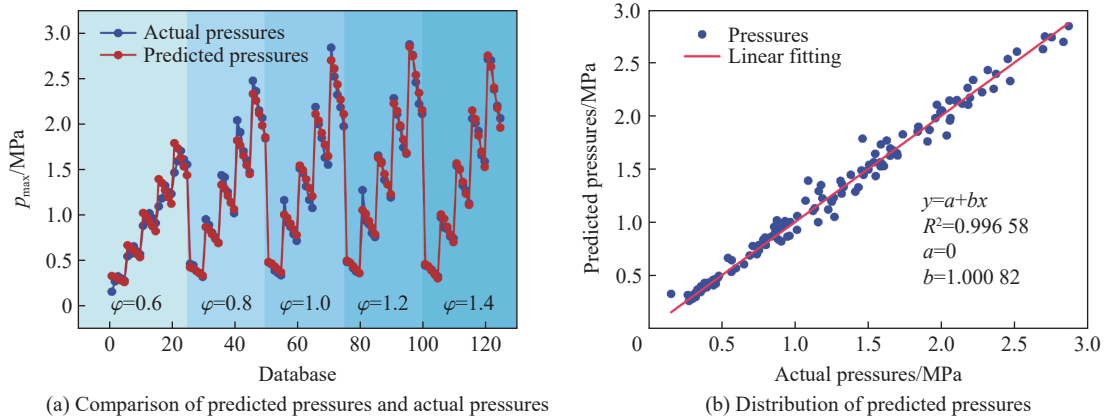


图 8 最大爆炸压力预测值与实际值的拟合结果

Fig. 8 Fitting results of predicted values and actual values of maximum explosion pressure

图 8(b) 中,  $y$  表示模型预测的  $p_{\max}$ ,  $x$  表示实测的  $p_{\max}$ , 使用直线方程  $y=a+bx$  进行线性回归。若  $a$  越接近 0、 $b$  越接近 1, 则模型拟合程度越好。在图 8(b) 中, 线性回归方程的  $a=0$ ,  $b=1.00082$ , 说明方程拟合程度良好, 模型具有较好的预测效果。

为了验证模型在其他工况下是否适用, 利用拉丁超立方抽样法选取了 6 组工况, 涵盖了不同的  $\varphi$ 、 $T_0$  以及  $p_0$ , 以保证抽样的全面性。将基于 1stOpt 模型的预测结果与实验测试结果进行对比, 结果如表 3 所示。从表中可以发现, 预测结果与实验结果较为接近, 相对误差均小于 10%。这说明在本文的实验条件 ( $0.1 \text{ MPa} \leq p_0 \leq 0.5 \text{ MPa}$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.6 \leq \varphi \leq 1.4$ ) 下, 该预测模型能够较好的实现对于甲烷  $p_{\max}$  的预测。

表 3 模型预测结果与实验结果对比

Table 3 Comparison between the prediction results and the experimental results

序号	$p_0/\text{MPa}$	$T_0/^\circ\text{C}$	$\varphi$	$p_{\max}/\text{MPa}$		相对误差/%
				实测值	预测值	
1	0.35	80.416	1.185	1.773	1.764	0.508
2	0.13	97.067	0.984	0.605	0.567	6.281
3	0.15	81.376	0.991	0.748	0.678	9.358
4	0.41	74.65	0.810	1.919	1.769	7.817
5	0.15	195.14	1.155	0.571	0.580	1.576
6	0.35	120.16	0.919	1.564	1.527	2.366

## 4 结 论

(1) 初始温度和初始压力耦合条件下, 随着初始压力的升高, 初始温度对  $p_{\max}$  的影响程度增强; 随着初始温度的升高, 初始压力对  $p_{\max}$  的影响程度减弱。

(2) 初始压力和当量比耦合条件下, 在研究的实验条件范围内, 当  $0.9 < \varphi < 1.2$  时, 低压环境对  $p_{\max}$  影响更大; 当  $\varphi < 0.9$  和  $\varphi > 1.2$  时, 高压环境对  $p_{\max}$  影响更大。

(3) 初始温度和当量比耦合条件下, 在研究的实验条件范围内, 当  $\varphi < 1.15$  时, 低温环境对  $p_{\max}$  影响更大; 当  $\varphi > 1.15$  时, 高温环境对  $p_{\max}$  影响更大。另外, 富燃料状态下  $p_{\max}$  变化加剧。

(4) 本文所建立的数学模型精度较高, 适应性较好, 可实现实验条件范围内对于甲烷  $p_{\max}$  的预测。

## 参考文献:

- [1] 李擘, 王建良, 刘睿, 等. 碳中和目标下天然气产业发展的多情景构想 [J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 183–192.  
LI N, WANG J L, LIU R, et al. Multi-scenario conception on the development of natural gas industry under the goal of carbon neutrality [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 183–192.
- [2] 李鹭光. 中国天然气工业发展回顾与前景展望 [J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 1–11. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.001.  
LI L G. Development of natural gas industry in China: Review and prospect [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 1–11. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.001.
- [3] 周守为, 朱军龙, 单彤文, 等. 中国天然气及 LNG 产业的发展现状及展望 [J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 1–8. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2022.01.001.  
ZHOU S W, ZHU J L, SHAN T W, et al. Development status and outlook of natural gas and LNG industry in China [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 1–8. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2022.01.001.
- [4] 任韶然, 李海奎, 李磊兵, 等. 惰性及特种可燃气体对甲烷爆炸特性的影响实验及分析 [J]. 天然气工业, 2013, 33(10): 110–115. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2013.10.019.  
REN S R, LI H K, LI L B, et al. An experimental study of effects of inert and special flammable gases on methane's explosion



- characteristic [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(10): 110–115. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2013.10.019.
- [5] MITU M, BRANDES E. Influence of pressure, temperature and vessel volume on explosion characteristics of ethanol/air mixtures in closed spherical vessels [J]. *Fuel*, 2017, 203: 460–468. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.04.124.
- [6] 丁以斌, 高伟. 当量比和初压对二甲醚-空气爆炸特性的影响研究 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(5): 2076–2080. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2020.0347.
- DING Y B, GAO W. Effect of the equivalence ratio and the initial pressure on the particular features of the dimethyl ether-air explosion [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(5): 2076–2080. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2020.0347.
- [7] 梁运涛, 曾文. 激波诱导瓦斯爆炸的动力学特性及影响因素 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(4): 370–376. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)04-0370-07.
- LIANG Y T, ZENG W. Kinetic characteristics and influencing factors of gas explosion induced by shock wave [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(4): 370–376. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)04-0370-07.
- [8] 余明高, 孔杰, 王燕, 等. 不同浓度甲烷-空气预混气体爆炸特性的试验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(6): 85–90. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2014.06.021.
- YU M G, KONG J, WANG Y, et al. Experiment study on explosion characteristic features of the methane-air pre-mixture at different concentrations [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(6): 85–90. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2014.06.021.
- [9] 王文涛, 程扬帆, 姚雨乐, 等. 当量比对乙炔/空气爆炸特性和火焰速度的影响 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(2): 433–442.
- WANG W T, CHENG Y F, YAO Y L, et al. Effects of equivalence ratios on explosion characteristics and flame speeds of acetylene/air mixture [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(2): 433–442.
- [10] TRAN M V, SCRIBANO G, CHONG C T, et al. Simulation of explosion characteristics of syngas/air mixtures [J]. *Energy Procedia*, 2018, 153: 131–136. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.10.024.
- [11] 王华, 邓军, 葛岭梅. 初始压力对矿井可燃性气体爆炸特性的影响 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(3): 423–428. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2011.03.026.
- WANG H, DENG J, GE L M. Influence of initial pressure on explosion characteristics of flammable gases in coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 423–428. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2011.03.026.
- [12] HUANG L, WANG Y, PEI S, et al. Effect of elevated pressure on the explosion and flammability limits of methane-air mixtures [J]. *Energy*, 2019, 186: 115840. DOI: 10.1016/j.energy.2019.07.170.
- [13] CUI G, LI Z, YANG C. Experimental study of flammability limits of methane / air mixtures at low temperatures and elevated pressures [J]. *Fuel*, 2016, 181(1): 1074–1080.
- [14] 高娜, 胡毅亭, 张延松. 初始温度对甲烷-空气爆炸压力影响的试验研究 [J]. *爆破器材*, 2016, 45(3): 26–30. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2016.03.006.
- GAO N, HU Y T, ZHANG Y S. Experimental research on methane-air mixtures explosion pressure under normal and elevated initial temperatures [J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(3): 26–30. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2016.03.006.
- [15] CAMMAROTA F, DI BENEDETTO A, RUSSO P, et al. Experimental analysis of gas explosions at non-atmospheric initial conditions in cylindrical vessel [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2010, 88(5): 341–349. DOI: 10.1016/j.psep.2010.05.001.
- [16] 李润之, 司荣军. 低温环境下甲烷爆炸流场特性模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 901–906. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0901-06.
- LI R Z, SI R J. Simulation study of flow field characteristics of gas explosion in low temperature environment [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 901–906. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0901-06.
- [17] MITTAL M. Explosion pressure measurement of methane-air mixtures in different sizes of confinement [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 46: 200–208. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.02.022.
- [18] KUNDU S, ZANGANEH J, MOGHADDERI B. A review on understanding explosions from methane-air mixture [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 507–523. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.004.
- [19] 余明高, 阳旭峰, 郑凯, 等. 障碍物对甲烷/氢气爆炸特性的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 19–27. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172.
- YU M G, YANG X F, ZHENG K, et al. Effect of obstacles on explosion characteristics of methane/hydrogen [J]. *Explosion*

- and Shock Waves, 2018, 38(1): 19–27. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172.
- [20] BAI C, CHANG X, ZHANG B. Impacts of turbulence on explosion characteristics of methane-air mixtures with different fuel concentration [J]. *Fuel*, 2020, 271: 117610. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117610.
- [21] AL-MAIDI A A H, RODIONOV Y V, NIKITIN D V, et al. Analysis of the characteristics of natural gas as fuel for vehicles and agricultural tractors [J]. *Plant Archives*, 2019, 19(1): 1213–1218.
- [22] 任韶然, 黄丽娟, 张亮, 等. 高压高温甲烷-空气混合物爆炸极限试验 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(6): 98–103.
- REN S R, HUANG L J, ZHANG L, et al. Experiment on explosion limits of methane-air mixtures at high pressure and high temperature [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences)*, 2019, 43(6): 98–103.
- [23] 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. DOI: 10.1016/0950-4230(95)00054-2.
- [24] 高娜, 张延松, 胡毅亭. 温度、压力对甲烷-空气混合物爆炸极限耦合影响的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(3): 453–458. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0453-06.
- GAO N, ZHANG Y S, HU Y T. Experimental study on methane-air mixtures explosion limits at normal and initial temperatures and pressures [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(3): 453–458. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0453-06.
- [25] 喻健良, 姚福桐, 于小哲, 等. 高温和高压对乙烷在氧气中爆炸极限影响的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(12): 122101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0381.
- YU J L, YAO F T, YU X Z, et al. Experimental study on the influence of high temperature and high pressure on the upper limit of explosion of ethane in oxygen [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(12): 122101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0381.
- [26] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [27] DANSON F M, ROWLAND C S. Training a neural network with a canopy reflectance model to estimate crop leaf area index [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(23): 4891–4905. DOI: 10.1080/0143116031000070319.

(责任编辑 王小飞)