

低频和高频交流电场助燃对比及燃烧特征参数预测研究

段浩, 尹晓军, 寇海亮, 张猛, 曾科

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为探究不同频率交流电场助燃的内在机制, 利用定容燃烧试验平台比较了低频(40、60、80、100 Hz)和高频(15、20、25、30 kHz)交流电场对甲烷/空气稀薄燃烧(过量空气系数为1.2、1.4、1.6)火焰的影响, 并利用机器学习方法对混合气的燃烧特征参数进行了预测研究。结果表明: 低频和高频交流电场下, 火焰在电场方向上均被拉伸, 不同频率交流电场对火焰传播的促进效果处于同一量级, 但低频交流电场下的火焰锋面更加稳定; 高频交流电场对燃烧特性参数的影响更加显著, 其对应的压力峰值和压力升高率峰值均比低频交流电场下变化更大; 采用支持向量机方法构建的平均火焰传播速度和燃烧压力峰值的预测模型相关系数均高于0.998, 平均绝对百分比误差和希尔不等系数分别小于1.093%和0.007, 均具有良好的预测性能和泛化能力。研究进一步验证了低频和高频交流电场的助燃机制, 证实了机器学习方法应用于基础燃烧特征参数预测的可行性, 丰富了电场助燃理论。

关键词: 电场辅助燃烧; 双离子风效应; 电化学效应; 机器学习; 支持向量机

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202305012 **文章编号:** 0253-987X(2023)05-0118-10

Comparison of Combustion Assisted by Low- and High-Frequency AC Electric Fields and Prediction of Combustion Characteristic Parameters

DUAN Hao, YIN Xiaojun, KOU Hailiang, ZHANG Meng, ZENG Ke

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract: This paper explores the internal combustion promotion mechanism of AC electric field with different frequencies. A comparison is made on the effect of low-frequency (40, 60, 80, 100 Hz) and high-frequency (15, 20, 25, 30 kHz) AC electric fields on methane/air lean combustion (excess air ratio of 1.2, 1.4, 1.6) flames with a constant volume combustion test platform. The machine learning method is applied to predict the combustion characteristic parameters of the mixture under various AC fields. The results show that, under low-frequency and high-frequency AC fields, the flame is stretched in the electric field direction; the effect in promoting flame propagation is of the same order of magnitude, but the flame front under low-frequency AC fields is more stable; the effect of high-frequency AC fields on combustion characteristic parameters (peak pressure and peak pressure rise rate) is more significant than under low-frequency ones; the prediction models built by the support vector machine method have excellent prediction performance and generalization ability, with the correlation coefficients of higher than 0.998, and the average absolute percentage error

and Hill's coefficients of inequality of less than 1.093% and 0.007, respectively. The research further verified the combustion promotion mechanism of low-frequency and high-frequency AC fields and confirmed the feasibility of machine learning method in the prediction of fundamental combustion characteristic parameters, enriching the electric field combustion theory.

Keywords: electric field assisted combustion; bi-ionic wind effect; electrical-chemical effect; machine learning; support vector machine

电场辅助燃烧作为强化燃烧的有效途径和必要手段,具有影响直接、作用迅速、易于控制和调节等优点。研究表明,电场可以有效促进火焰传播,强化燃烧过程^[1-2],增强火焰稳定性,抑制燃烧振荡^[3],同时能够显著影响火焰形状和排放^[4-5]。此外,研究人员针对电场助燃的内在机制进行了系统研究,发现直流电场、低频和高频交流电场对燃烧和火焰的影响分别可以用离子风效应^[6-7]、双离子风效应^[8-9]和电化学效应^[10-11]进行解释。

目前,电场辅助燃烧的研究主要在本生灯^[12-13]和定容燃烧弹^[14-15]等平台上开展。为减少试验量,CHEMKIN 等仿真计算被用来模拟燃料燃烧过程中的复杂化学反应^[16-17]。然而,区别于一般的燃料燃烧过程,电场辅助燃烧涉及热力学、电学和化学反应动力学等多学科知识的耦合,内部作用机制十分复杂,因此目前难以借助仿真工具进行模拟。支持向量机^[18-19]等机器学习方法试图从大量历史数据中挖掘出隐藏规则以进行预测或分类,近年来已被

逐渐应用于基础燃烧领域^[20-21],但该方法在电场辅助燃烧方面的研究仍然比较欠缺。事实上,电场特性参数和燃烧初始参数与燃烧特征参数(火焰传播和燃烧特性参数)之间存在着难以用数学或物理方法描述的非线性关系,而机器学习方法所构建的黑箱模型恰恰是描述这种复杂关系的有效工具。考虑到低频和高频交流电场助燃机制仍不够清晰,本文利用定容燃烧试验平台,结合高速摄影和纹影技术,对比了低频和高频交流电场对甲烷/空气火焰传播和燃烧过程的影响差异,并利用支持向量机方法构建燃烧特征参数的预测模型并进行寻优,分析了最优模型的预测精度和泛化能力。

1 试验系统

图 1 为本文所采用的定容燃烧试验平台,主要由定容燃烧弹、进排气管路、点火装置、高速摄像机、纹影系统、压力采集仪器和高压电源等组成。

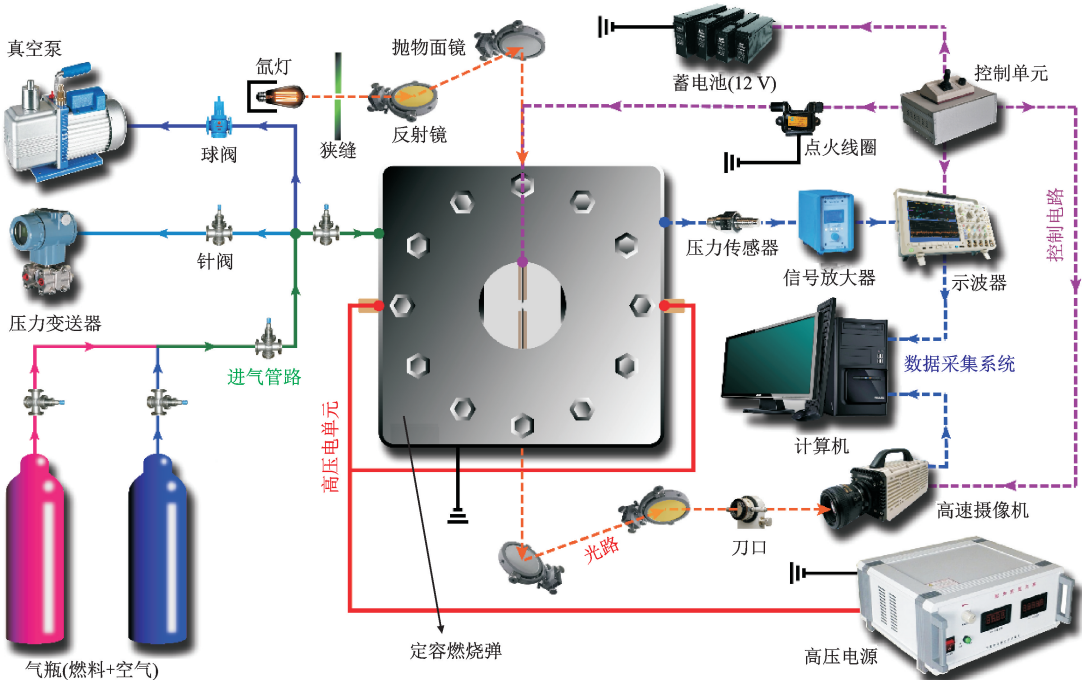


图 1 定容燃烧试验平台

Fig. 1 Constant volume combustion experimental platform

定容燃烧弹为具有 $\Phi 113\text{ mm}\times 130\text{ mm}$ 内腔的碳钢圆柱体结构,内部紧密嵌入聚四氟乙烯(PT-FE)绝缘套,防止高压电极和容弹内壁之间出现放电现象。定容燃烧弹中心竖直方向对称安装了一对点火电极($\Phi 2\text{ mm}$),间距为 2 mm ;水平方向对称安装了一对网状高压电极($\Phi 60\text{ mm}$),间距为 70 mm 。高压电极两端连接高压电源,点火完成后,点火电路断开,点火电极恢复接地状态,从而在弹体内部构建高压电场环境(图 2)。低频交流电源为四维电气有限公司定制的 XIELI HV20 kV/10-1 000 Hz 型高压电源,有效电压和电场频率分别为 $0\sim 20\text{ kV}$ 和 $10\sim 1\,000\text{ Hz}$ 连续可调;高频交流电源为咸阳威思曼电源有限公司生产的 WPS20P20 型高压电源,有效电压和电场频率分别为 $0\sim 20\text{ kV}$ 和 $0\sim 50\text{ kHz}$ 连续可调。电源输出波形均为正弦波,可采用 Tektronix P6015A 高压探头检测,初始电压相位为 0° 。

纹影系统由狭缝光源产生装置、反射镜、刀口和电源变压器等组成。定容燃烧弹两侧安装了一对石英玻璃窗以提供光路,并用盖板固定。采用 RED-LAKE 公司生产的 HG-100 K 型高速摄像机记录火

焰传播过程,拍摄频率为 $5\,000\text{ 帧/s}$ 。压力采集仪器包括压力传感器、电荷放大器和数据采集仪。压力传感器(Kistler 7061B)将压力信号转换为电信号,测量范围为 $0\sim 25\text{ MPa}$,最大采样频率为 10 MHz ,精度为 0.5% 。电荷放大器(Kistler 4618A)用于放大电信号。采用 DL750 示波器观察放大后的电信号,采集频率为 20 kHz ,误差小于 0.3% 。进气压力由 Rosemount 3051T 型压力变送器控制,精度为 0.15% 。采用上海精益真空泵厂的 2XZ-4 型真空泵冲洗定容燃烧弹。甲烷和空气(N_2 和 O_2 体积比为 $79\%:21\%$)分别储存在两个独立的气瓶中。

试验在环境压力和温度下进行。首先,利用真空泵清洗定容燃烧弹并将其内部抽成真空,根据过量空气系数计算所得的分压将甲烷和空气分别缓慢注入。接着打开高压电源,构建高压电场环境。然后点火,为使混合气混合均匀,点火前需将注入混合气的定容燃烧弹静置 150 s 。燃烧过程结束后立即切断高压电源,排出废气。每组试验工况重复 5 次,以确保数据的准确性。

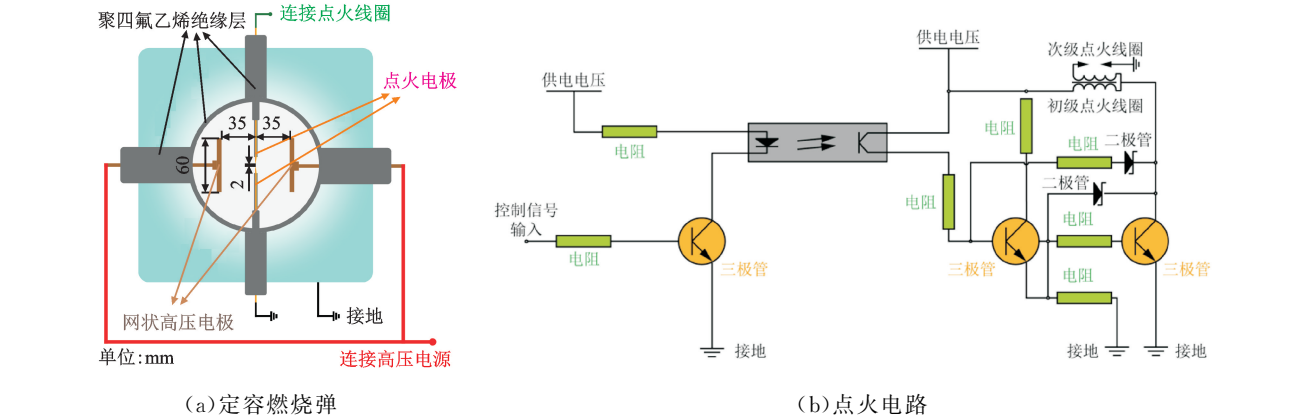


图 2 定容燃烧弹和点火电路

Fig. 2 Constant volume combustion chamber and ignition circuit

2 支持向量机

支持向量机(support vector machine,SVM)是一种根据监督学习对数据进行分类的广义线性分类器,该方法基于 VC(Vapnik-Chervonenkis)维理论和结构风险最小化(structural risk minimization,SRM)原理,主要用于解决小样本回归问题。

对于线性回归问题,假设样本集为 $\{(x_i,y_i)\},i=1,2,\cdots,l$ $x_i\in\mathbf{R}^n,y_i\in\mathbf{R}$

(1)

式中: x_i 为 n 维自变量向量; y_i 为 x_i 对应的因变量;

l 为数据集的样本量。

回归问题要求根据样本数据推导因变量 y 对自变量 x 的关系,为此引入不敏感损失函数 ϵ ,定义如下

$$|y-f(x)|_{\epsilon}=\begin{cases}0,&|y-f(x)|<\epsilon\\|y-f(x)|-\epsilon,&|y-f(x)|\geq\epsilon\end{cases}$$

(2)

式中: f 为决策函数。

对线性问题,决策函数 f 定义为

$$f(x)=w\cdot x+b$$

(3)

式中: w 为权重向量; b 为偏差。推导后可得

$$\min \frac{1}{2} \| \mathbf{w} \|^2 \quad \text{s. t.} \quad \begin{cases} y_i - (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) - b \leq \epsilon \\ (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b - y_i \leq \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

最小化 $\min \frac{1}{2} \| \mathbf{w} \|^2$ 的实质就是最小化 VC 维。

为防止过学习,引入松弛变量 ξ_i 和 ξ_i^* ,从而使决策函数对模型具有一定容忍度,优化问题最终转化为

$$\min \frac{1}{2} \| \mathbf{w} \|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*)$$
$$\text{s. t.} \quad \begin{cases} y_i - (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) - b \leq \epsilon \\ (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b - y_i \leq \epsilon \\ \xi_i, \xi_i^* > 0 \quad i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (5)$$

式中 C 为惩罚因子,其值越大,对超出敏感损失带的数据点惩罚越大。

利用拉格朗日函数以及最优化问题的卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker,KKT)条件

$$\begin{cases} a_i [\epsilon + \xi_i - y_i + (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) - b] = 0 \\ a_i^* [\epsilon + \xi_i^* - y_i + (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) - b] = 0 \\ (C - a_i) \xi_i = 0 \\ (C - a_i^*) \xi_i^* = 0 \end{cases} \quad (6)$$

最终的回归估计函数可确定如下

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}) + b \quad (7)$$

式中 a_i 和 a_i^* 为拉格朗日乘子,非零乘子对应的解即为支持向量。

对非线性问题,引入核函数将样本映射到高维空间,使其转化为高维空间中的线性回归问题。通过核函数 $K(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 映射之后,决策函数如下

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \cdot \varphi(\mathbf{x}) + b \quad (8)$$

式中 $\varphi(\mathbf{x})$ 表示输入样本,最终得到的回归函数为

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) K(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}) + b \quad (9)$$

影响模型的主要参数包括惩罚因子 C 、核函数宽度 σ 和不敏感损失函数 ϵ 。本文通过网格寻优获取最优模型对应的参数组合。采用相关系数(R)来评估自变量和因变量之间的相关性;采用平均绝对百分比误差(ϵ_{MAPE})和希尔不等系数(ϵ_{TIC})评价模型的预测能力。SVM 建模和分析的整个过程如图 3 所示。

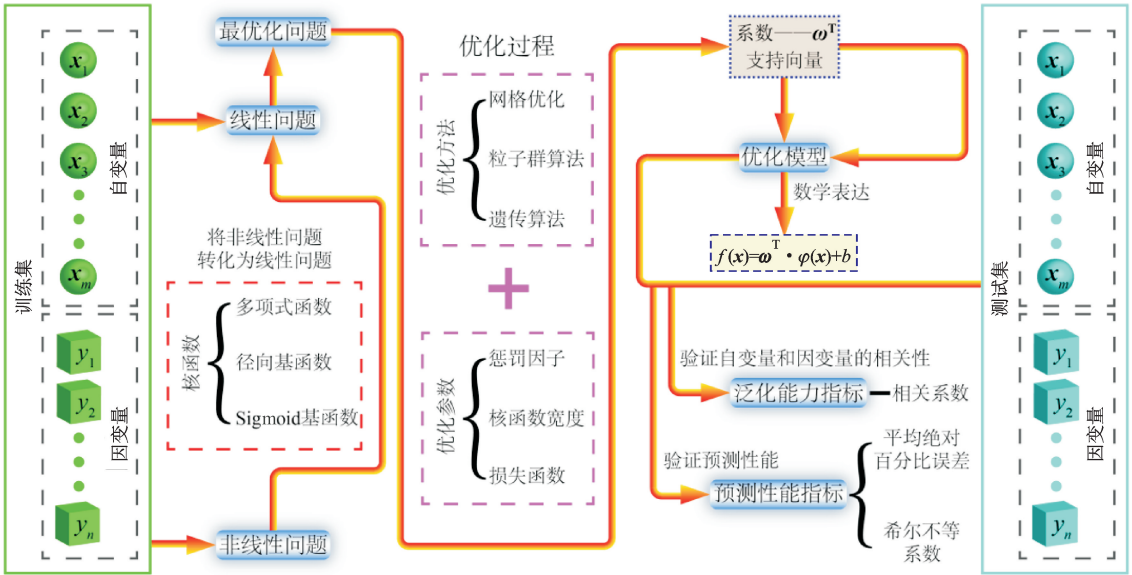


图 3 SVM 建模和分析过程
Fig. 3 SVM modelling and analysis process

3 试验结果与分析

为对比低频和高频交流电场的助燃效果,本文在稀薄燃烧条件(过量空气系数为 1.2、1.4、1.6)下,研究了加载电压有效值(U)为 5 kV 时,低频

(40、60、80、100 Hz)和高频(15、20、25、30 kHz)交流电场对甲烷/空气稀薄燃烧火焰传播和燃烧特性参数的影响规律,分别从火焰传播图片、平均火焰传播速度、燃烧压力峰值和压力升高率峰值等方面进行了比较。鉴于低频交流电场和高频交流电场的实验

结果已在作者之前的研究中报道^[22-23],因此本文主要进行对比研究,不再单独描述和解释每种电场下的火焰行为。

3.1 火焰传播图片

图4为过量空气系数为1.4时,不同交流电场下火焰传播图片的比较。由图可见,在电场作用下,火焰沿电场线方向(即水平方向)被显著拉伸,但在垂直于电场线方向几乎没有变化(这是由点火电极和PTFE绝缘层的影响造成的),说明双离子风效应和电化学效应都能影响火焰锋面的发展。低频交流电场下的火焰锋面更加圆整,而高频交流电场下则出现了更多褶皱,表明双离子风效应作为一种物理效应对火焰锋面的影响比电化学效应更稳定。电化学效应是一种化学效应,通过将火焰中的 N_2 激发到振荡级从而直接影响火焰中的分支反应速率^[11, 24],故内在机理更加复杂,导致在该效应影响下的火焰锋面不稳定。

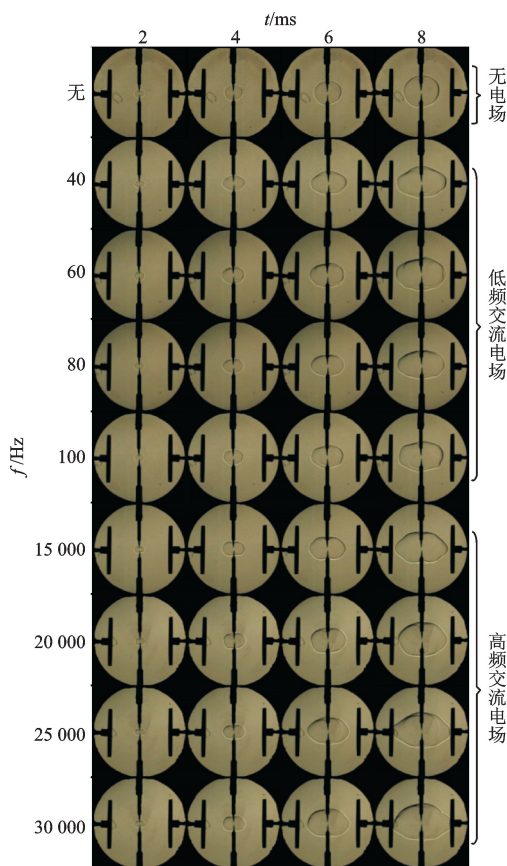


图4 不同交流电场下火焰传播比较($\lambda=1.4$)

Fig. 4 Comparison of flame propagation under different AC electric field ($\lambda=1.4$)

3.2 火焰传播速度

由于电场仅对水平方向上的火焰锋面有显著影响,因此本文仅讨论水平方向上的火焰变化。如图5所示,火焰半径(r_h)定义为与水平方向不同角度处($0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 165^\circ$ 和 180°)火焰半径($r_{hi}, i=1, 2, \dots, 6$)的平均值,计算公式如下

$$r_h = \sum_{i=1}^6 \frac{r_{hi}}{6} \quad (10)$$

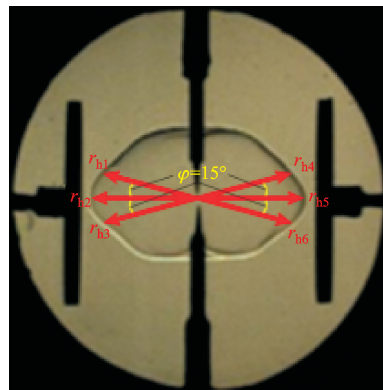


图5 火焰半径的定义

Fig. 5 Definition of flame radius

当火焰半径小于6 mm时,点火能量对火焰发展的影响较大^[25-26];当火焰半径大于25 mm时,火焰的发展不仅与定容燃烧弹内腔压力和温度的变化息息相关,还会受到高压电极结构的影响。因此,本文有效火焰半径取值为6~25 mm。平均火焰传播速度(S_a)定义为火焰半径从6 mm发展到25 mm时的平均速度,计算公式为

$$S_a = \frac{25 - 6}{t_e - t_b} \quad (11)$$

式中: t_b 和 t_e 分别为火焰半径发展到6 mm和25 mm时对应的时间。

定义各参数 A 的变化率 ΔA 为

$$\Delta A = \frac{A_U - A_0}{A_0} \quad (12)$$

式中 A_U 、 A_0 分别表示加载电场和未加电场时所对应参数 A 的值。参数 A 可以是平均火焰传播速度、燃烧压力峰值或压力升高率峰值等。通过 ΔA 可以更加准确地定量阐述电场对火焰传播和燃烧特性影响效应的强弱,也消除了燃烧条件变化(如初始压力和温度的变化、混合气混合强弱变化等)对燃烧的影响,便于对不同工况下电场影响燃烧的效应进行横向比较。

图 6 显示了不同过量空气系数下交流电场频率对火焰传播速度的影响。由图可知,加载不同频率的交流电场对平均火焰传播速度的提升幅度处于同一量级。当过量空气系数较小、混合气相对较浓时($\lambda=1.2$),不同频率的低频交流电场对平均火焰传播速度的平均提升幅度为 36.34%,而高频交流电场仅为 25.28%,此时低频交流电对火焰传播的促进作用明显优于高频交流电场;当过量空气系数提高到 1.4 时,低频和高频交流电场下平均火焰传播速度分别平均提升了 49.00%和 50.40%,两种交流电场对火焰传播的促进作用几乎相同;当过量空气系数较大、混合气相对较稀时($\lambda=1.6$),高频交流电场对火焰传播的促进作用(95.39%)明显超过了低频交流电场(70.31%)。

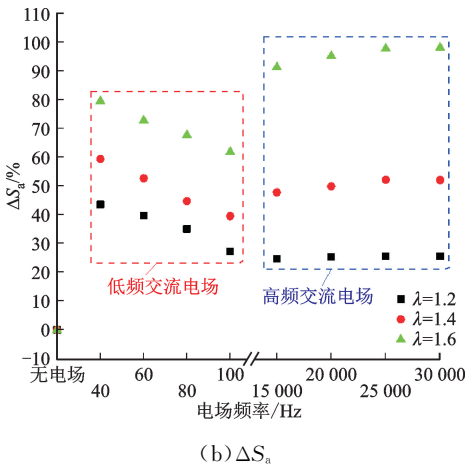
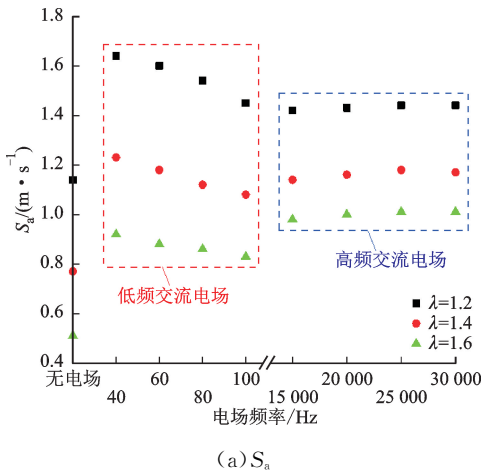


图 6 S_a 和 ΔS_a 随电场频率的变化($\lambda=1.2, 1.4, 1.6$)
Fig. 6 S_a and ΔS_a versus the electric field frequency
($\lambda=1.2, 1.4, 1.6$)

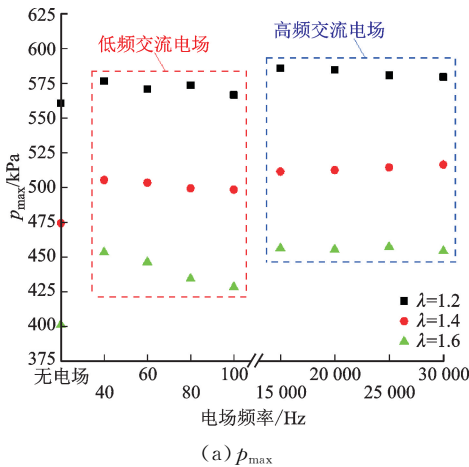
显然,不同交流电场对火焰传播的促进效果随过量空气系数的变化而变化。相比低频交流电场,高频交流电场的助燃效果对过量空气系数的变化更

为敏感。随着过量空气系数的增大,高频交流电场下平均火焰传播速度显著增大,而低频交流电场下的提升则相对有限,这主要是由二者的作用机制所决定的。过量空气系数增加时,混合气变稀,燃烧速度降低,电场作用于带电粒子的时间延长。对于低频交流电场,影响燃烧的机制是双离子风效应,是一个物理过程,其影响效果与电场作用时间呈现出线性增长的关系;对于高频交流电场而言,其内在作用机制(电化学效应)属于化学过程,吸收电场能量被激发的带电粒子数量随着电场作用时间的增加而增加,并直接影响燃烧过程中某些化学反应的反应速率,其作用效果很可能随作用时间的延长呈现出指数增加的规律。因此,随着混合气变稀,高频交流电场对火焰传播的促进作用逐渐超过了低频交流电场。

3.3 燃烧压力和压力升高率

本文所研究的燃烧特性参数包括燃烧压力峰值(p_{max})和压力升高率峰值(dp/dt),前者通过压力曲线直接获得,后者通过将燃烧压力(p)对时间微分计算所得。

图 7 和图 8 分别给出了不同频率的交流电场对燃烧压力和压力升高率峰值及其变化率的影响。由图可见,外加电场能够同时增加燃烧压力和压力升高率峰值,进一步表明交流电场能够有效促进燃烧。随着过量空气系数增加,电场作用下两者的峰值变化率随之增大,表明电场对稀混合气的助燃效果更佳。同时,与平均火焰传播速度的结果相似,高频交流电场在燃烧压力峰值和压力上升率峰值方面的改善效果略高于低频交流电场,表明高频交流电场对稀燃过程的促进作用优于低频交流电场。例如,当过量空气系数达到 1.6 时,低频交流电场下燃烧压力峰值和压力上升率峰值的最大增加幅度分别为 12.97%和 15.80%,而高频交流电场下则分别为 13.97%和 25.63%。



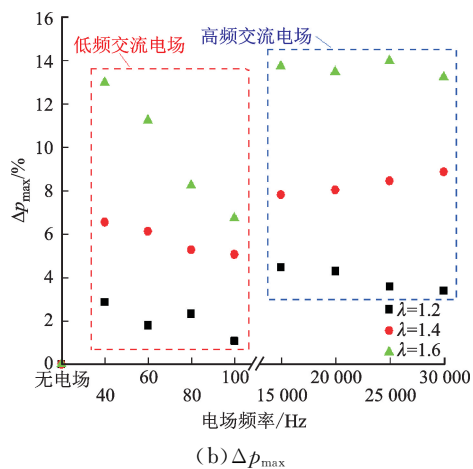


图 7 $p_{\max}$ 和 $\Delta p_{\max}$ 随电场频率的变化($\lambda=1.2, 1.4, 1.6$)
Fig. 7 $p_{\max}$ and $\Delta p_{\max}$ versus the electric field frequency ($\lambda=1.2, 1.4, 1.6$)

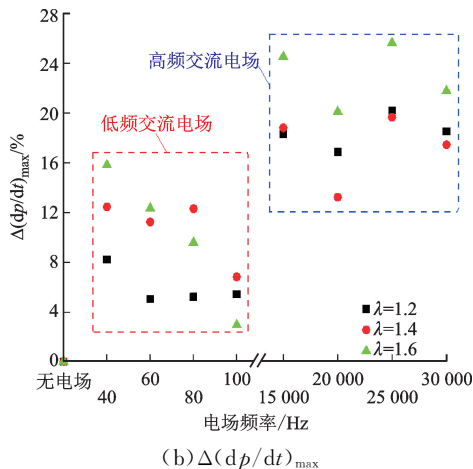
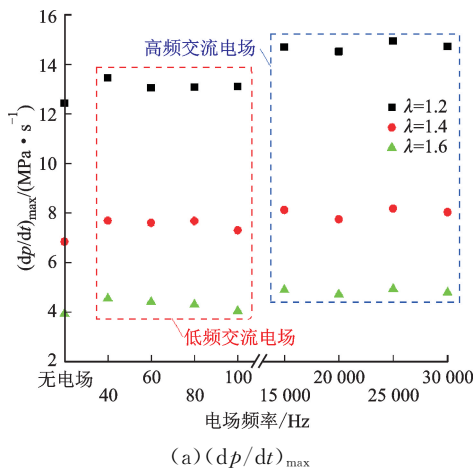


图 8 $(dp/dt)_{\max}$ 和 $\Delta(dp/dt)_{\max}$ 随电场频率的变化($\lambda=1.2, 1.4, 1.6$)
Fig. 8 $(dp/dt)_{\max}$ and $\Delta(dp/dt)_{\max}$ versus the electric field frequency ($\lambda=1.2, 1.4, 1.6$)

4 支持向量机回归结果和分析

分别基于低频和高频交流电场燃烧试验数据，

以过量空气系数、有效电压和电场频率为自变量，平均火焰传播速度和峰值燃烧压力为因变量建立了火焰传播和燃烧特性参数的支持向量机预测模型。表 1 为试验条件和范围。

表 1 试验条件和范围

Table 1 Experimental condition				
电场	自变量	参数范围	训练集	测试集
低频	加载电压/kV	0,1,2,3,4,5	50 组	22 组
	交流 电场频率/Hz	40,60,80,100		
	过量空气系数	1.2,1.4,1.6		
高频	加载电压/kV	0,1,2,3,4,5	100 组	44 组
	交流 电场频率/Hz	5,7.5,10,12.5,15,20,25,30		
	过量空气系数	1.2,1.4,1.6		

为了避免数据范围对回归精度的影响,在训练之前对所有变量进行了归一化,采用的公式如下

$$x = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{13}$$

分别以低频和高频交流电场试验数据为样本,并分别以 S_a 和 $p_{\max}$ 为预测对象,所得最优模型对应的惩罚因子 C_{best} 、核函数宽度 σ_{best} 和不敏感带损函数 ϵ_{best} 组合分别如表 2 所示。

表 2 最优模型参数

Table 2 Parameters corresponding to the optimal models				
电场	因变量	C_{best}	σ_{best}	ϵ_{best}
低频交流电场	S_a	111.22	0.66	0.001
	$p_{\max}$	588.13	0.76	0.001
高频交流电场	S_a	3.03	1.24	0.001
	$p_{\max}$	1351.18	1.32	0.001

最佳模型分别用于预测每组测试集的平均火焰传播速度或最大压力。图 9 展示了预测值与试验值的比较结果,可以看到 S_a 和 $p_{\max}$ 的预测值与试验数据几乎相同。为了评估最优模型的泛化能力,本文研究了模型的相关系数。对于自变量 $\mathbf{x}_i(\mathbf{x}_i = [x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}], m \in \mathbf{R})$ 和因变量 y , 回归函数描述如下

$$\hat{y} = a_{0i} + a_{1i}x_{1i} + \dots + a_{mi}x_{mi} \tag{14}$$

式中: $\hat{y}$ 为 y 的预测值; $\mathbf{a} = [a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{mi}]$ 为回归系数向量。因此,相关系数的计算公式为

$$R = \frac{\sum (y - \bar{y})(\hat{y} - \bar{y})}{\sqrt{\sum (y - \bar{y})^2 (\hat{y} - \bar{y})^2}}, 0 \leq y \leq 1 \tag{15}$$

式中: $\bar{y}$ 为因变量 y 的平均值。

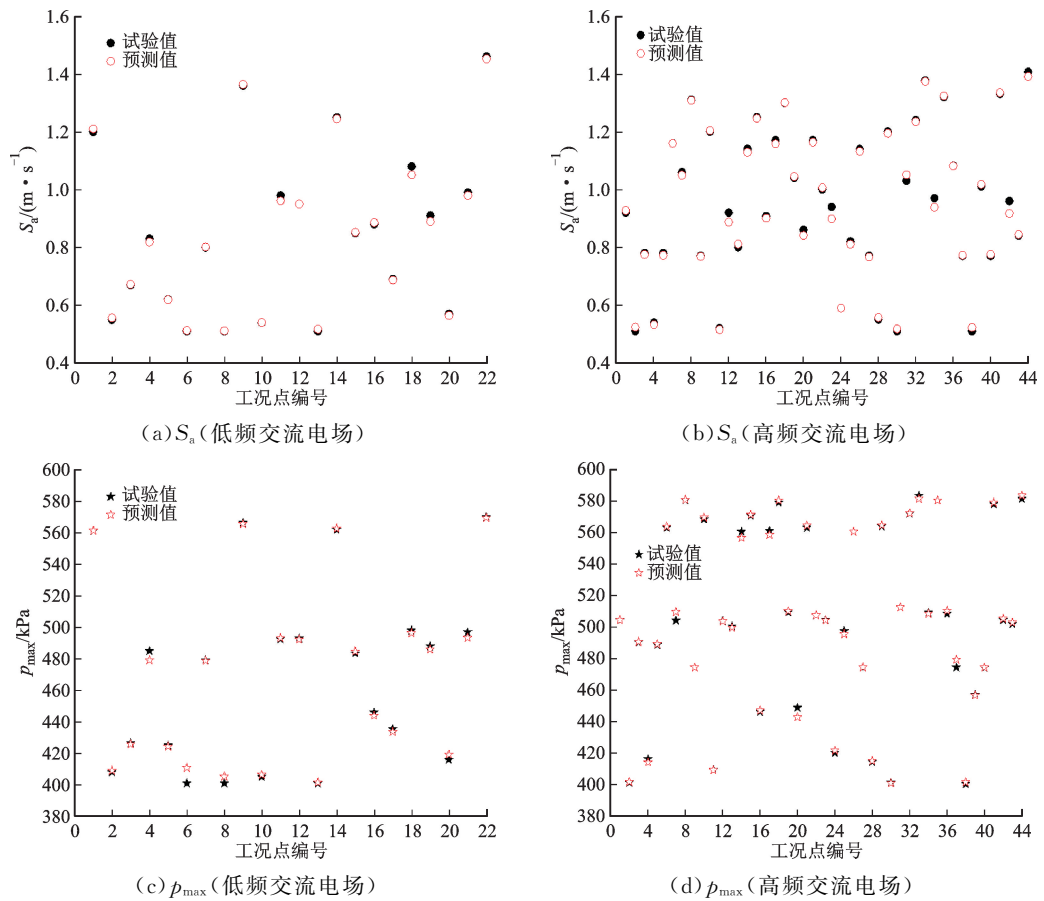


图 9 预测结果和试验结果对比 (S_a 和 P_{max})

Fig. 9 Comparison of prediction and experimental results (S_a and P_{max})

通常,当相关系数大于 0.7 时,可以认为自变量与因变量之间高度相关。表 3 显示,本文所建立模型的相关系数均大于 0.998,证明自变量和因变量之间高度相关,所得最优模型均具有优异的泛化能力。

表 3 最优模型评价参数

Table 3 Evaluation results of the optimal model				
电场	因变量	R	$\epsilon_{MAPE}/\%$	ϵ_{TIC}
低频交 流电场	S_a	0.999 5	0.806	0.005 63
	p_{max}	0.998 8	0.449	0.003 15
高频交 流电场	S_a	0.998 7	1.093	0.006 99
	p_{max}	0.999 5	0.233	0.001 83

表 3 同时给出了最优模型的平均绝对百分比误差 ϵ_{MAPE} 和希尔不等系数 ϵ_{TIC} , 计算公式分别如下

$$\epsilon_{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \times 100 \right| \quad (16)$$

$$\epsilon_{TIC} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (17)$$

式中: n 为测试集的样本数; $\hat{y}_i$ 为第 i 个样本预测模型的预测值; y_i 为试验值。

通常,如果预测结果的 ϵ_{MAPE} 低于 10%, 则认为该模型的预测精度满足要求。对于本文所建立的所有 SVM 模型,最大 ϵ_{MAPE} 仅为 1.093%, 表明最优模型对 S_a 或 p_{max} 的预测性能足够准确。 ϵ_{TIC} 越接近 0, 预测精度越高。基于本文获得的最优模型计算得到的 ϵ_{TIC} 均低于 0.007, 进一步验证了 SVM 模型优良的预测性能。图 10 显示了低频和高频交流电场测试集数据的相对误差。可以看到, S_a 和 p_{max} 的相对误差 δS_a 和 δp_{max} 分别被控制在 5% 和 3% 以内, 表明利用 SVM 方法预测 S_a 或 p_{max} 均可令人信服。

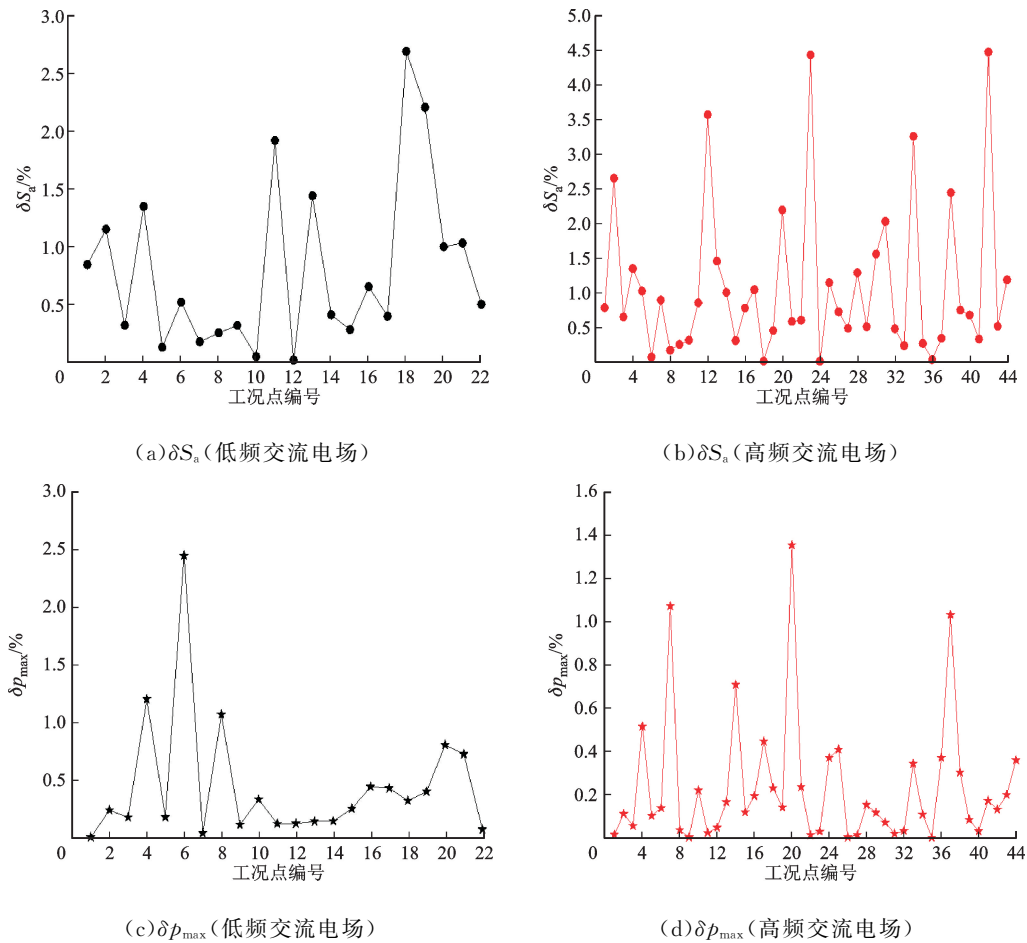


图 10 预测结果的相对误差(S_a 和 P_{max})

Fig. 10 Relative error of prediction results (S_a and P_{max})

5 结 论

(1)高频和低频交流电场下,火焰明显向电场方向拉伸,高频交流电场影响下火焰前锋不如低频条件下稳定。不同电场频率对平均火焰传播速度的促进效果处于同一量级。过量空气系数增加时,高频交流电场对平均火焰传播速度的促进效果显著增大,而低频交流电场则相对有限。

(2)支持向量机方法所得最优模型的相关系数均高于 0.998,平均绝对百分比误差和希尔不等系数分别小于 1.093%和 0.007,表明其预测性能和泛化能力十分优异,验证了机器学习方法应用于电场辅助燃烧领域燃烧特征参数预测的可行性。

参考文献:

[1] VAN DEN BOOM J D B J, KONNOV A A, VERHASSELT A M H H, et al. The effect of a DC electric field on the laminar burning velocity of premixed

methane/air flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 1237-1244.
[2] 孙天旗, 刘杰, 段浩, 等. 不同电极下电场对甲烷/空气稀燃火焰影响的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 38-43.
SUN Tianqi, LIU Jie, DUAN Hao, et al. Effects of electric fields with different electrodes on methane/air lean combustion flame [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 38-43.
[3] GAN Yunhua, LUO Yanlai, WANG Mei, et al. Effect of alternating electric fields on the behaviour of small-scale laminar diffusion flames [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 306-315.
[4] ULYBYSHEV K E. Calculation of the effect of a constant electric field on the gas dynamics and nitrogen oxide emission in a laminar diffusion flame [J]. Fluid Dynamics, 2000, 35(1): 38-42.
[5] 段浩, 房建峰, 孙天旗, 等. 不同电极结构下电场对甲烷/空气火焰的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(9): 62-67.

- DUAN Hao, FANG Jianfeng, SUN Tianqi, et al. Effects of electric fields in different electrode structures on methane/air flames [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9): 62-67.
- [6] ZHEN H S, WANG Z W, LIU X Y, et al. An experimental study on the effect of DC electric field on impinging flame [J]. Fuel, 2020, 274: 117846.
- [7] BUTTERWORTH T D, CHA M S. Electric field measurement in electric-field modified flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 6651-6660.
- [8] PARK D G, CHUNG S H, CHA M S. Dynamic responses of counterflow nonpremixed flames to AC electric field [J]. Combustion and Flame, 2018, 198: 240-248.
- [9] KANG M S, PARK S H, YOO C S, et al. Effect of core metal on flame spread and extinction for horizontal electrical wire with applied AC electric fields [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(3): 4747-4756.
- [10] ZHANG Yang, WU Yuxin, YANG Hairui, et al. Effect of high-frequency alternating electric fields on the behavior and nitric oxide emission of laminar nonpremixed flames [J]. Fuel, 2013, 109: 350-355.
- [11] STARIKOVSKII A Y. Plasma supported combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 32(2): 2405-2417.
- [12] TROIANI G, BATTISTA F, PICANO F. Turbulent consumption speed via local dilatation rate measurements in a premixed Bunsen jet [J]. Combustion and Flame, 2013, 160(10): 2029-2037.
- [13] TAMADONFAR P, GÜLDER Ö L. Flame brush characteristics and burning velocities of premixed turbulent methane/air Bunsen flames [J]. Combustion and Flame, 2014, 161(12): 3154-3165.
- [14] WOLK B, DEFILIPPO A, CHEN J Y, et al. Enhancement of flame development by microwave-assisted spark ignition in constant volume combustion chamber [J]. Combustion and Flame, 2013, 160(7): 1225-1234.
- [15] 崔雨辰, 段浩, 李超, 等. 电场分布对球形传播火焰变形率的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 49-55.
- CUI Yuchen, DUAN Hao, LI Chao, et al. Effects of electric field distribution on deformation rates of spherical propagation flame [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(5): 49-55.
- [16] NIKOLAOU Z M, CHEN J Y, SWAMINATHAN N. A 5-step reduced mechanism for combustion of $\text{CO}/\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4/\text{CO}_2$ mixtures with low hydrogen/methane and high H_2O content [J]. Combustion and Flame, 2013, 160(1): 56-75.
- [17] 李超, 张聪, 吴筱敏, 等. 交流电场气动效应对球形传播火焰影响的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(11): 20-25.
- LI Chao, ZHANG Cong, WU Xiaomin, et al. Numerical simulation for AC electric field aerodynamic effect on spherically expanding flame [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(11): 20-25.
- [18] 徐洲常, 王林军, 刘洋, 等. 采用改进回归型支持向量机的滚动轴承剩余寿命预测方法 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(3): 197-205.
- XU Zhouchang, WANG Linjun, LIU Yang, et al. A prediction method for remaining life of rolling bearing using improved regression support vector machine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(3): 197-205.
- [19] 方源, 章桐, 陈霏霏, 等. 电动车动力总成噪声品质粒子群-向量机预测模型 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 41-46.
- FANG Yuan, ZHANG Tong, CHEN Feifei, et al. Sound quality prediction of electric power train noise based on particle swarm optimization and support vector machine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 41-46.
- [20] MEHRA R K, DUAN Hao, LUO Sijie, et al. Laminar burning velocity of hydrogen and carbon-monoxide enriched natural gas (HyCONG): an experimental and artificial neural network study [J]. Fuel, 2019, 246: 476-490.
- [21] COCCO MARIANI V, HENNINGS OCH S, DOS SANTOS COELHO L, et al. Pressure prediction of a spark ignition single cylinder engine using optimized extreme learning machine models [J]. Applied Energy, 2019, 249: 204-221.
- [22] DUAN Hao, WU Xiaomin, HOU Juncai, et al. Experimental study of lean premixed $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{O}_2$ flames under low-frequency alternating-current electric fields [J]. Fuel, 2016, 181: 1011-1019.
- [23] DUAN Hao, WU Xiaomin, ZHANG Cong, et al. Experimental study of lean premixed $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{O}_2$ flames under high-frequency alternating-current electric fields [J]. Energy & Fuels, 2015, 29(11): 7601-7611.
- [24] SHEBEKO Y N. Effect of an ac electric field on normal combustion rate of organic compounds in air [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1982, 18(4): 476-484.

(下转第148页)

tion Science, 2017, 3(4): 041017.

- [17] GAD-BRIGGS A, PILIDIS P, NIKOLAIDIS T. Analyses of the control system strategies and methodology for part power control of the simple and intercooled recuperated Brayton helium gas turbine cycles for generation IV nuclear power plants [J]. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2017, 3(4): 041016.
- [18] LI Zhi, YANG Xiaoyong, WANG Jie, et al. Off-design performance and control characteristics of space reactor closed Brayton cycle system [J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 128: 318-329.
- [19] SINGH R, KEARNEY M P, MANZIE C. Extremum-seeking control of a supercritical carbon-dioxide closed Brayton cycle in a direct-heated solar thermal power plant [J]. Energy, 2013, 60: 380-387.
- [20] MOISSEYTSEV A, SIENICKI J J. Supercritical carbon dioxide cycle control analysis. [EB/OL]. (2011-04-11)[2022-08-01]. <https://www.osti.gov/biblio/1011299/>.
- [21] MUÑOZ DE ESCALONA J M, SÁNCHEZ D, CHACARTEGUI R, et al. Performance analysis of hybrid systems incorporating high temperature fuel cells

and closed cycle heat engines at part-load operation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(1): 570-578.

- [22] WU Pan, GAO Chuntian, SHAN Jianqiang. Development and verification of a transient analysis tool for reactor system using supercritical CO₂ Brayton cycle as power conversion system [J]. Science and Technology of Nuclear Installations, 2018, 2018: 6801736.
- [23] CLEMENTONI E M, COX T L, KING M A. Response of a compact recuperator to thermal transients in a supercritical carbon dioxide Brayton cycle [C]// ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2017: V009T38A002.
- [24] POPE M A, LEE J I, HEJZLAR P, et al. Thermal hydraulic challenges of gas cooled fast reactors with passive safety features [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(5): 840-854.
- [25] WU Pan, GAO Chuntian, HUANG Yanping, et al. Supercritical CO₂ Brayton cycle design for small modular reactor with a thermodynamic analysis solver [J]. Science and Technology of Nuclear Installations, 2020, 2020: 5945718.

(编辑 亢列梅)

(上接第 127 页)

427-429.

- [25] HUANG Zuohua, ZHANG Yong, ZENG Ke, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures [J]. Combustion and Flame, 2006, 146(1/2): 302-311.

- [26] LAMOUREUX N, DJEBAÏLI-CHAUMEIX N, PAILLARD C E. Laminar flame velocity determination for H₂-air-He-CO₂ mixtures using the spherical bomb method [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, 27(4): 385-393.

(编辑 亢列梅)