

外加湍流强度对乙烯爆炸特性的影响*

汤迅¹, 洪雨², 张田娇³, 李艳超¹

(1.大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116024;

2.中国石油集团安全环保技术研究院, 辽宁 大连 116031;

3.中国安全生产科学研究院, 北京 100012)

摘要: 本研究旨在阐明外加湍流对乙烯-空气爆炸特性的影响。在配备风扇生成湍流系统、高速纹影成像和压力采集装置的定容燃烧弹中开展实验, 系统研究了湍流强度和当量比对火焰形态、传播速度、爆炸超压和压力上升速率的影响。实验中, 湍流强度依据相同实验装置的湍流标定结果进行设置, 并通过高速纹影图像识别火焰前锋位置, 计算等效火焰半径和火焰传播速度; 进一步采用湍流火焰雷诺数、Karlovitz 数和 Damköhler 数表征湍流与火焰传播过程的相互作用, 并通过瞬态压力测量获得爆炸超压和压力上升速率, 同时计算单位面积热损失。在此基础上, 构建融合初始条件、峰值和平滑性约束的物理引导神经网络模型, 并与极端梯度提升模型进行对比, 以预测不同工况下的爆炸超压演化。结果表明: 增大湍流强度促进火焰表面褶皱并加速火焰传播, 在湍流强度为 0.44~0.60 m/s 时增强效应最为显著; 归一化湍流火焰传播速度随湍流雷诺数增大呈现自相似行为, 基于 Karlovitz 数和 Damköhler 数的关联式可准确描述火焰加速过程, R^2 均高于 0.91。此外, 较高的湍流强度通过改善燃料-空气混合和降低热损失, 提高了最大爆炸超压和压力上升速率。物理引导神经网络能够有效改善纯数据驱动模型在初始阶段和压力衰减阶段的物理不一致预测, 并提高爆炸超压预测性能。上述研究结果为湍流增强的乙烯爆炸危害提供了定量认识, 并为乙烯相关工业过程的安全评估提供了支撑。

关键词: 乙烯爆炸; 湍流强度; 超压预测; 物理引导神经网络

中图分类号: O381; TQ083.4 **国标学科代码:** 620.30 **文献标识码:** A

Effects of external turbulence intensity on ethylene explosion characteristics

TANG Xun¹, HONG Yu², ZHANG Tianjiao³, LI Yanchao¹

(1. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, 2 Linggong Rd., Dalian 116024, China;

2. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology, 68-8 Shiyu Rd., Dalian 116031, China;

3. China Academy of Safety Science and Technology, No. 32 Beiyuan Road, Beijing 100012, China)

Abstract: The influence of external turbulence on the explosion characteristics of premixed ethylene-air mixtures was investigated to clarify the coupled effects of turbulence intensity and equivalence ratio on flame propagation and explosion pressure evolution. Experiments were conducted in a constant-volume combustion chamber equipped with a fan-generated turbulence system, a high-speed schlieren imaging system, and a transient pressure acquisition system. The turbulence intensity was varied from 0.00 to 0.60 m/s, while the equivalence ratio ranged from 0.6 to 2.0, covering lean, near-stoichiometric, and rich

*收稿日期: 2026-08-18; 修回日期: 2026-09-24;

基金项目: 国家自然科学基金 (52274178、52474211); 中央引导地方科技发展资金 (2025JH6/101000001);

第一作者: 汤迅 (2003—), 女, 本科. E-mail: txzyzyry@mail.dlut.edu.cn;

通信作者: 李艳超 (1989—), 男, 博士, 副教授. E-mail: lyc092451@dlut.edu.cn。

combustion conditions. The turbulence intensity was determined according to the calibration relationship between fan operating conditions and velocity fluctuation established by particle image velocimetry measurements for the same experimental apparatus. High-speed schlieren images were processed to identify the flame front and determine the equivalent flame radius and flame propagation velocity. Turbulent flame propagation was further characterized using the turbulent flame Reynolds number, while the Karlovitz number and Damköhler number were introduced to describe the interaction between turbulent transport and chemical reaction time scales. Explosion overpressure and pressure rise rate were obtained from transient pressure measurements, and the heat loss per unit area was estimated from the energy variation of the combustion system. In addition, a physics-guided neural network was developed to predict the temporal evolution of explosion overpressure. Initial-condition, peak-value, and smoothness constraints were incorporated into the model loss function, and the prediction performance was compared with that of an Extreme Gradient Boosting model using grouped cross-validation based on the experimental operating conditions.

The results show that increasing turbulence intensity promotes flame-front wrinkling and accelerates flame propagation, with the enhancement becoming particularly pronounced at high turbulence intensities. The normalized turbulent flame propagation velocity exhibits an increasing trend with the turbulent flame Reynolds number. Correlations incorporating the Karlovitz number and Damköhler number provide good descriptions of the normalized flame propagation velocity, with coefficients of determination exceeding 0.91. Increasing turbulence intensity also increases the maximum explosion overpressure and maximum pressure rise rate under the investigated conditions, while reducing the heat loss per unit area. The effect of equivalence ratio on explosion pressure differs between lean-to-near-stoichiometric and rich mixtures, reflecting the combined influence of fuel concentration, flame propagation, and heat release. The physics-guided neural network provides more physically consistent overpressure evolution than the Extreme Gradient Boosting model and improves prediction performance, particularly during the initial and pressure-decay stages. These results provide quantitative insight into the interactions among external turbulence, flame propagation, heat loss, and explosion pressure evolution, and provide a basis for evaluating explosion hazards in ethylene-related confined industrial processes.

Keywords: Ethylene explosion; Turbulence intensity; Overpressure prediction; Physics-guided neural network

符号表

符号	含义 (单位)
Φ	当量比
u'	湍流强度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
λ	热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
ρ_u	未燃气体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_b	燃烧产物密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
c_p	定压比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
T_u	未燃气体的温度/K
T_b	燃烧产物的温度/K
δ	层流火焰厚度/mm
σ	热膨胀比
S_L	层流燃烧速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
S_T	湍流燃烧速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Le	Lewis 数
Ka	Karlovitz 数
Da	Damköhler 数

D_T	混合气体的热扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
D_{AB}	混合气体的质量扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
L_I	湍流积分尺度/(mm)
r	等效火焰半径/(mm)
A_f	火焰前锋包围区域的投影面积/(m^2)
$Re_{T,flame}$	湍流火焰雷诺数
$P_{\max}$	最大超压/kPa
$(dP/dt)_{\max}$	最大压力上升速率/($\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$)
$P_{\max,ad}$	理论爆炸超压峰值/kPa
q	单位面积热损失/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)
S	燃烧室内表面积/ m^2
V	燃烧室容积/ m^3
γ_e	已燃气体绝热指数
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	物理约束权重系数
L	模型综合损失函数
ω	峰值约束权重

1 引言

乙烯 (C_2H_4) 是一种典型的危险化学品, 在石油化工行业中发挥着重要作用^[1, 2]。虽然乙烯是生产多种化工产品最重要的基本原料之一, 但其固有的物化性质使乙烯相关工艺极易发生火灾和爆炸事故。根据其安全技术说明书 (Material Safety Data Sheet, MSDS) 及相关研究, 乙烯是极易燃气体, 能够在较宽的浓度范围内与空气形成爆炸性混合物^[3-5]。由于其点火能低、化学反应活性高, 明火、高温热源、静电放电或与氧化性物质接触等引起的意外点火均可能导致快速燃烧和爆炸。此外, 乙烯作为压缩高压气体, 在异常热工况下还存在潜在物理爆炸风险^[4, 6, 7]。因此, 乙烯已被列为重点监管的危险化学品, 其生产、储存、运输和加工过程需要采取严格的安全控制措施。乙烯相关事故的严重后果进一步凸显了认识其爆炸行为的必要性。在全球乙烯生产和运输过程中曾发生多起重大爆炸事故, 造成重大人员伤亡和经济损失。例如, 2022 年中国石化茂名石化乙烯泄漏爆炸事故造成 2 人死亡、1 人受伤, 此前的多起乙烯装置爆炸事故也造成了严重的人员和财产损失。这些事故表明, 有效预防和减轻乙烯爆炸危害仍是化工过程安全中的关键问题。

在实际工业环境中, 乙烯泄漏和爆炸很少发生在理想的静止条件下。在管道输送、设备运行、通风或意外泄漏过程中, 可燃混合物往往伴随着复杂的流动扰动^[8-10]。此类扰动会产生初始湍流, 通过增强燃料-空气混合、增大火焰表面不稳定性、加速火焰传播和加剧压力生成而显著影响火焰演化与爆炸发展^[11-13]。因此, 在静止或层流条件下获得的爆炸参数可能低估工业场景中的实际危害。全面认识湍流条件下乙烯的爆炸特性, 对于准确开展风险评估和安全设计至关重要。

已有研究对乙烯-空气混合物的燃烧和爆炸特性进行了广泛研究。层流乙烯火焰的研究主要集中在基础燃烧参数, 包括不同压力、温度和氧化剂条件下的层流燃烧速度等, 这些研究为了解乙烯化学动力学和火焰传播机理提供了重要依据。在大范围当量比下已直接测得常压乙烯-空气层流燃烧速度, 其结果与此前室温数据吻合^[14, 15]。在 1~2 atm 的定容容器中研究了高压条件下乙烯-空气火焰传播, 结果表明压力同时影响火焰速度和火焰结构^[16-18]。Huo 等^[19]采用向外传播球形火焰技术系统测定了不同压力条件下乙烯-空气混合物的层流燃烧速度。Adusumilli 等^[2]给出了高温预热和稀释氧化剂条件下乙烯层流火焰速度的试验测量与模拟结果, 表明室温条件下乙烯火焰速度测量结果与此前文献和化学动力学模型预测结果吻合良好。在爆炸行为方面, 研究者已考察了初始压力、燃料浓度、容器几何

形状和泄放条件等对爆炸强度的影响。密闭容器研究表明, 乙烯-空气最大爆炸压力和最大压力上升速率强烈依赖于浓度、初始压力和容器几何形状。Wang 等^[20]实验研究了不同乙烯比例下化学计量 $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4$ -空气混合物的湍流爆炸特性, 结果表明提高乙烯比例和湍流强度均会加剧爆炸强度, 表现为更高的最大爆炸压力 ($P_{\max}$) 和压力上升速率 ($(dp/dt)_{\max}$)。Cao 等^[21]系统研究了静止条件下方形容器内乙烯-空气混合物的泄爆特性, 揭示了浓度、泄爆面积和泄爆压力对内部峰值超压的影响。然而, 多数研究是在相对理想化的条件下进行的, 未考虑外部流动扰动的影响。现有研究覆盖最多的扰动效应包括泄放、障碍物诱导湍流以及少数外加湍流或风况, 但对外部扰动条件明确、系统的纯乙烯-空气数据仍然较少^[8, 22, 23]。

与此同时, 湍流对不同可燃气体爆炸特性的影响已得到广泛研究。Amyotte 等^[24]提供了高压和湍流条件下乙烯-空气爆炸的关键数据, 证实初始湍流会改变受限和泄放乙烯-空气爆燃中的压力发展过程, 并伴随胞状火焰形成和泄放诱导湍流。RAZUS 等^[25]研究了不同初始压力下细长容器内乙烯在浓度范围内的爆炸行为, 发现其爆炸特性受长径比影响显著。对于乙烯-空气混合物, 湍流条件下的研究相对有限。其余大部分证据来自甲烷、合成气、氢气、丙烷及甲烷-乙烯混合燃料, 这些研究一致表明, 更强的外加湍流会加剧火焰褶皱、压力上升和爆炸强度。例如, Bai 等^[26]研究了不同燃料浓度下湍流对 CH_4 -空气混合物爆炸特性的影响, 发现湍流对爆炸的增强作用在很大程度上取决于初始时间和爆炸时间。在爆炸过程中, 当热损失与湍流达到最优水平时会出现临界状态, 该状态与初始时间和爆炸时间的最优值有关。Wang 等^[20]通过实验研究了不同乙烯比例下化学计量 $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4$ -空气混合物的湍流爆炸特性, 结果表明湍流能够重新分布燃料、增大湍流动能、扭曲火焰前锋, 并在泄放过程中强化外部火焰发展。当乙烯比例已经较高时, 湍流效应可能变得不明显, 而乙烯本身仍会提高混合燃料的压力、层流燃烧速度和反应强度^[27, 28]。综上所述, 现有结果大多来自混合燃料系统或不受控的扰动环境, 难以定量阐明湍流强度与乙烯爆炸特性之间的关系。

综合已有研究可以发现, 现有乙烯燃烧与爆炸研究主要集中于层流燃烧速度、高压燃烧、密闭容器爆炸以及泄爆条件下的压力演化等方面; 已有部分湍流研究则主要针对混合燃料体系、障碍物诱导湍流或泄放过程中的复杂流动条件。相比之下, 针对纯乙烯-空气预混体系, 在可控外加湍流强度下同时开展火焰形态、火焰传播及爆炸压力演化研究的工作仍相对有限。此外, 已有研究较少从无量纲湍流参数角度建立火焰传播速度的统一关联, 也较少将爆炸超压实验数据与具有物理约束的机器学习预测方法相结合。因此, 本文在受控外加湍流条件下系统改变当量比和湍流强度, 进一步分析火焰传播与爆炸压力之间的关联, 以全面认识湍流增强的乙烯爆炸行为。

此外, 可靠地预测爆炸压力演化对于工业安全管理至关重要。传统经验关联式和纯数据驱动模型往往缺乏物理约束, 在训练范围之外的条件下可能产生不可靠的预测。因此, 发展将实验数据与基础物理知识相结合的预测方法, 对于提高爆炸风险评估的准确性和适用性十分必要。针对上述研究空白, 本研究系统考察了外部湍流强度对预混乙烯-空气爆炸特性的影响。实验在配备受控湍流生成系统、高速纹影成像和瞬态压力测量装置的定容燃烧弹中进行, 分析了湍流强度和当量比对火焰形态、传播速度、爆炸超压和压力上升速率的影响。此外, 构建了融合物理约束的物理引导神经网络模型用于预测超压演化。研究结果为湍流增强的乙烯爆炸机理提供了新的认识, 并为乙烯相关工业过程的安全评估和防控策略提供了可靠依据。

2 实验方法

图 1 为湍流乙烯爆炸实验平台, 包括配气系统、点火系统、定容燃烧弹、高速纹影系统、压力测量系统和时序控制器。为保证配气精度, 采用高精度数字压力表进行压力测量。点火能量为 40 J/ms, 点火持续时间为 10 ms。燃烧弹内径为 150 mm, 配有直径 60 mm 的观察窗。为产生均匀各向同性湍流, 4 个同步控制的电机驱动直径为 60 mm 的内部风扇, 为获得不同强度的外加湍流, 本文参

考 Liang 等^[29]针对相同实验装置开展的湍流特性研究。该研究采用粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV) 对非反应条件下燃烧室内流场进行测量, 并以速度脉动均方根值表征湍流强度, 建立了风扇运行工况与湍流强度之间的对应关系。基于该标定结果, 本文选取 $u' = 0.00$ 、 0.17 、 0.33 、 0.44 和 0.60 m/s 作为实验工况, 其中 $u' = 0.00$ m/s 表示无外加湍流条件。采用高速纹影系统采集火焰图像, 压力测量系统用于捕捉爆炸过程中的瞬态压力波动, 时序控制器用于协调高速相机、数据采集记录仪和点火过程。

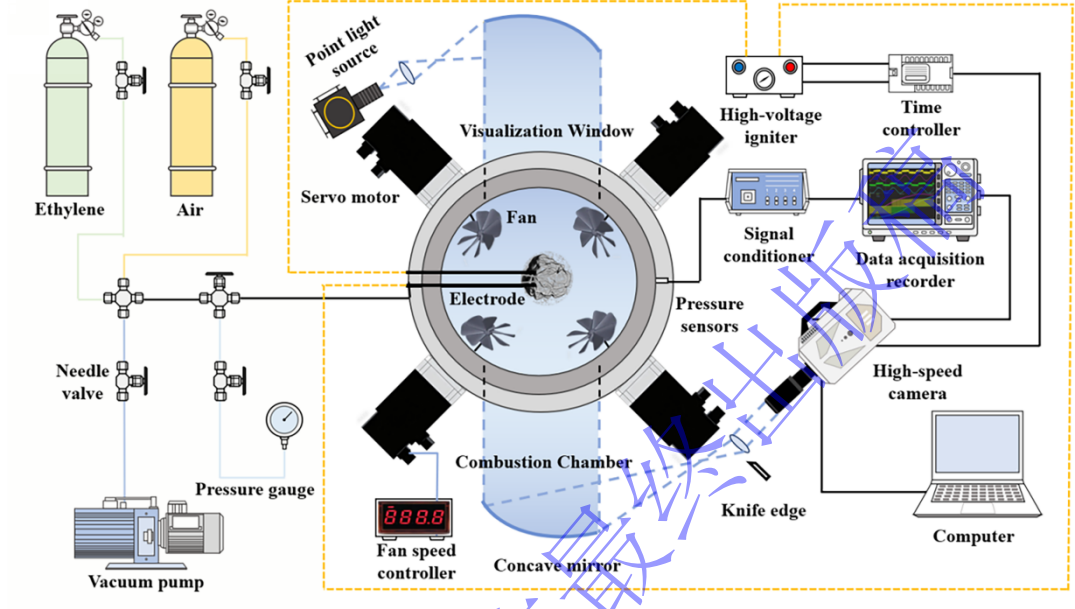


图 1 湍流乙烯爆炸实验平台

Fig.1 Experimental platform of turbulent ethylene explosion

实验步骤如下: (1) 使用真空泵抽空燃烧弹及管道内的空气, 通过针阀和压力表调节乙烯/空气混合比例, 确保反应气体纯度不低于 99.99%; 每次配气操作后, 输送管道需抽真空至系统压力达到动态平衡状态; (2) 根据 Liang 等^[29]给出的风扇运行工况与湍流强度对应关系, 设置相应的风扇运行工况并启动电机, 风扇旋转 60 s 后流场趋于稳定; (3) 触发点火指令, 预混可燃气体立即点燃, 同时使用高速相机和数据采集系统记录火焰传播与压力数据。高速纹影图像用于识别火焰前锋位置并计算火焰传播特征, 压力采集数据用于获得爆炸超压及压力上升速率; (4) 关闭电机并停止风扇; (5) 依次进行排气、抽真空和洗气, 待温度下降后再进行下一次实验。为降低湍流和火焰随机性的影响, 同一工况需重复实验 3~5 次, 并对重复实验结果进行一致性检查, 以保证火焰传播和压力测试结果具有良好的重复性。

基于上述实验流程, 开展系列试验以考察湍流强度对火焰形态、传播速度和爆炸超压的影响。本研究以当量比 ϕ 和外加湍流强度 u' 为主要控制变量, 通过改变当量比考察混合气体组成对燃烧和爆炸特性的影响, 并通过逐级增加外加湍流强度分析湍流扰动的增强作用。表 1 汇总了乙烯-空气预混火焰的实验条件与性质。当量比设置为 0.6~2.0, 覆盖贫燃、接近化学计量和富燃条件。通过改变当量比考察混合物组成对火焰传播及爆炸压力特性的影响, 并通过逐级增加湍流强度分析外加湍流的增强作用。本研究采用基于热扩散的方法确定火焰厚度^[30]:

$$\delta = (2\lambda / \rho_u c_p S_L) \cdot (T_b / T_u)^{0.7} \dots\dots\dots (2)$$

其中, λ 是热导率, ρ_u 是未燃气体密度, c_p 是定压比热容, T_b 是燃烧产物温度, T_u 是未燃气体温度。

热膨胀比定义为未燃气体密度 (ρ_u) 与已燃气体密度 (ρ_b) 之比^[31]:

$$\sigma = \rho_u / \rho_b \quad (3)$$

Lewis 数 (Le) 为热扩散系数 (D_T) 与质量扩散系数 (D_{AB}) 之比^[32]:

$$Le = D_T / D_{AB} \quad (4)$$

Karlovitz 数 (Ka) 和 Damköhler 数 (Da) 对应的公式如下^[29]:

$$Ka = (u' / S_L)^{1.5} \cdot (\delta / L_I)^{0.5} \quad (5)$$

$$Da = (u' / S_L)^{-1} \cdot (L_I / \delta) \quad (6)$$

式(4) - (5)中 u' 为湍流强度, L_I 为湍流积分尺度, S_L 为层流燃烧速度。

其中, 火焰厚度可用于表征预混火焰反应区的特征尺度, 热膨胀比用于描述未燃气体向已燃气体转化过程中密度变化, Lewis 数表征热扩散与质量扩散之间的相对关系, Ka 主要反映湍流对火焰内部结构及化学反应区的扰动程度, Da 反映流动过程与化学反应过程之间的时间尺度比。上述参数可以用于后续湍流火焰传播速度及无量纲特征参数的计算。公式(1) - (3)中热导率、未燃气体密度、定压比热容、燃烧产物温度、气体密度均采用 gaseq 进行计算。

表 1 乙烯-空气预混火焰的实验条件及性质
Table 1 Experimental conditions and properties of ethylene-air premixed flame

Φ	$S_L / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	δ / mm	$u' / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	L_I / mm	σ	Ka	Da	Le
0.6	0.23	0.58	0.17	6.81	6.02	0.183	15.936	1.68
			0.33	7.73		0.465	9.319	
			0.44	8.04		0.702	7.269	
			0.6	8.54		1.085	5.662	
0.8	0.41	0.36	0.17	6.81	7.22	0.061	45.276	1.64
			0.33	7.73		0.155	26.475	
			0.44	8.04		0.233	20.652	
			0.6	8.54		0.36	16.087	
1.0	0.62	0.25	0.17	6.81	8.01	0.028	96.001	1.06
			0.33	7.73		0.071	56.136	
			0.44	8.04		0.107	43.791	
			0.6	8.54		0.166	34.11	
1.2	0.74	0.21	0.17	6.81	8.22	0.02	138.279	1.06
			0.33	7.73		0.05	80.858	
			0.44	8.04		0.075	63.075	
			0.6	8.54		0.116	49.132	
1.4	0.73	0.2	0.17	6.81	8.1	0.019	142.353	1.06
			0.33	7.73		0.049	83.24	
			0.44	8.04		0.074	64.934	
			0.6	8.54		0.115	50.579	
1.6	0.58	0.25	0.17	6.81	7.92	0.03	92.98	1.05
			0.33	7.73		0.077	54.369	
			0.44	8.04		0.116	42.412	

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

			0.6	8.54		0.18	33.037	
			0.17	6.81		0.076	38.135	
1.8	0.36	0.38	0.33	7.73	7.72	0.193	22.299	1.05
			0.44	8.04		0.291	17.395	
			0.6	8.54		0.449	13.55	
			0.17	6.81		0.119	24.865	
2.0	0.29	0.46	0.33	7.73	7.52	0.303	14.54	1.05
			0.44	8.04		0.457	11.342	
			0.6	8.54		0.706	8.835	

3 结果与讨论

3.1 火焰形态特性

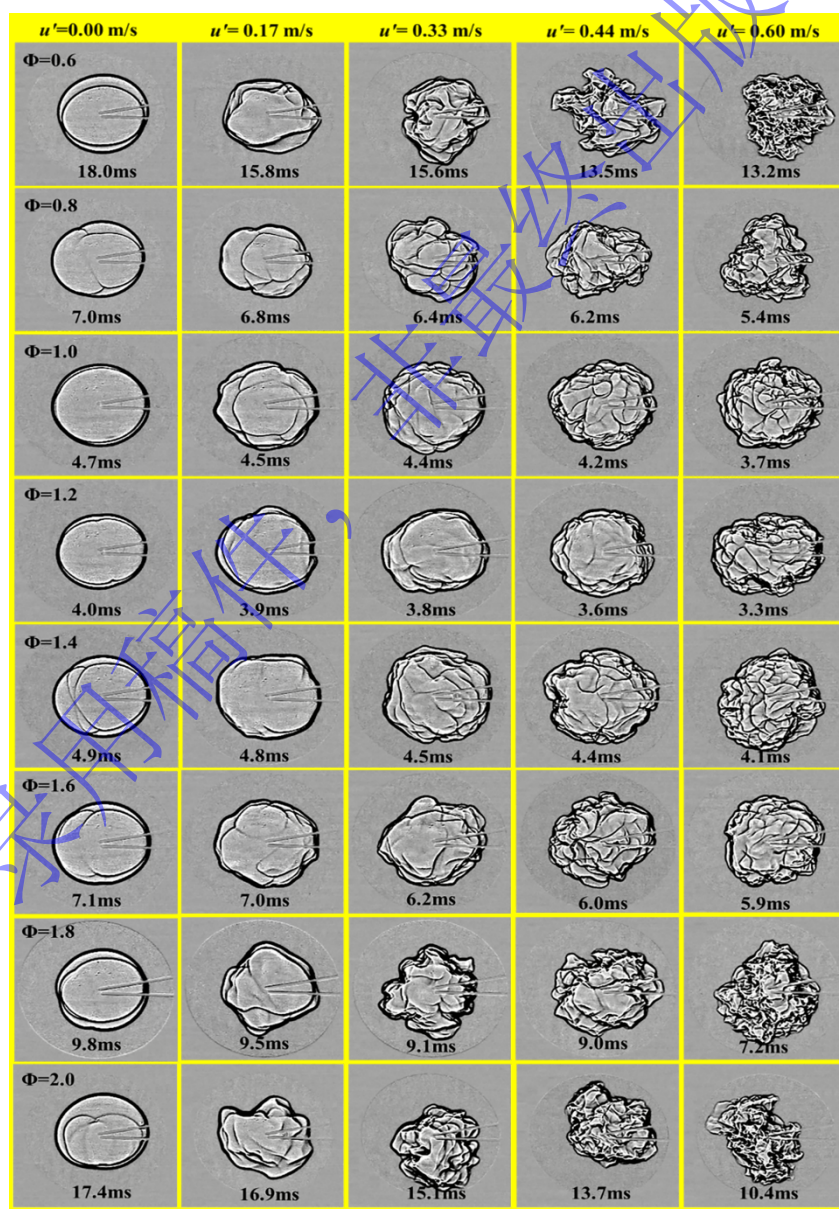


图2 湍流强度和当量比对化学计量比火焰形态的影响

Fig.2 Effects of turbulence intensity and equivalence ratio on flame morphology at the stoichiometric condition

图2给出了湍流强度对火焰形态的影响 ($r \approx 20$ mm)。在初始燃烧阶段,由于热扩散和质量扩散分布不稳定等因素,火焰表面经历流体力学不稳定,产生微观尺度褶皱结构。与 $u' = 0.00$ m/s 相比,湍流条件下火焰表面受到湍流扰动,出现更多褶皱。随着湍流强度增大,褶皱程度加深,火焰前锋的有效反应面积增加,从而促进火焰传播。在 $u' = 0.44 \sim 0.60$ m/s 范围内,火焰表面褶皱数量显著增加、褶皱程度明显加深,表明湍流扰动的作用明显强于 $u' = 0.17 \sim 0.33$ m/s 范围。在 $\Phi = 0.6 \sim 1.2$ 范围内,火焰逐渐发展为具有复杂褶皱结构的不规则形状。随着燃烧过程推进,火焰表面自由向未燃区域扩张,燃烧面积不断增大,到达燃烧室壁面的时间缩短。在 $\Phi = 1.4 \sim 2.0$ 范围内,随着点火时间延续,火焰传播速度逐渐降低,到达壁面所需时间增加。火焰形态演化直接影响其传播动力学。为定量刻画这一关系,分析了不同湍流强度下的火焰传播速度,其加速机理将在下文中讨论。综上,外加湍流主要通过增强火焰前锋表面褶皱、扩大有效反应面积促进火焰向外传播,而当量比则通过改变混合物的基础燃烧特性调节火焰形态及传播过程。为进一步定量描述上述影响,下面分析不同湍流强度下的火焰传播速度。

3.2 湍流燃烧速度关联

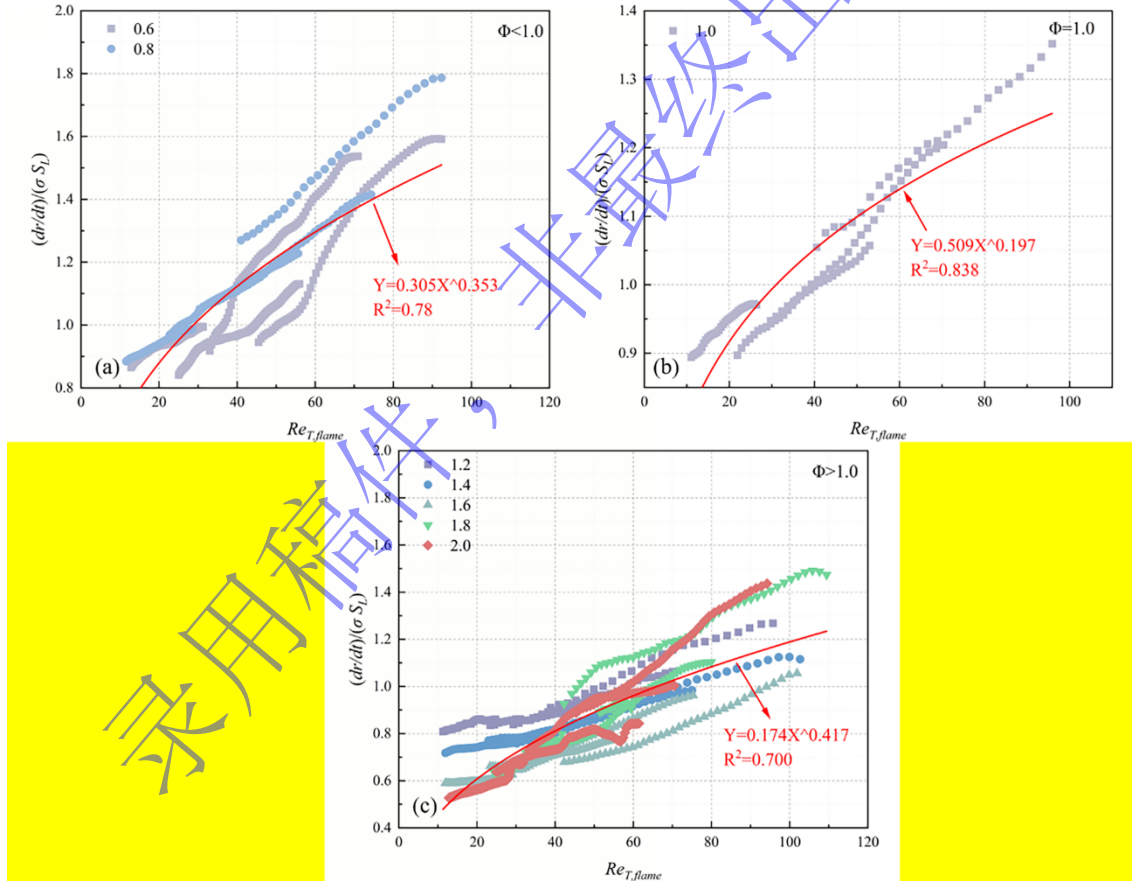


图3 不同当量比下归一化湍流火焰传播速度 $(dr/dt)/(\sigma S_L)$ 随 $Re_{T,flame}$ 的变化: (a) $\Phi < 1.0$; (b) $\Phi = 1.0$; (c) $\Phi > 1.0$

Fig.3 Normalized turbulent flame propagation speed $(dr/dt)/(\sigma S_L)$ as a function of $Re_{T,flame}$ under different equivalence ratios:

(a) $\Phi < 1.0$; (b) $\Phi = 1.0$; (c) $\Phi > 1.0$

为定量表征火焰传播过程,采用高速纹影图像识别火焰前锋位置。以点火位置为中心,根据纹影图像中火焰前锋与未燃气体之间的明显密度梯度确定火焰边界,并获得不同时间对应的火焰前锋位置。对于受湍流扰动后呈现非规则形态的火焰,采用火焰投影面积对应的等效圆半径 r 表征火焰尺度,即

$$r = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}} \quad (7)$$

式中， A_f 为火焰前锋包围区域的投影面积。火焰传播速度由等效火焰半径随时间的变化率确定，

$$S_T = \frac{dr}{dt} \quad (8)$$

式中， S_T 为湍流火焰传播速度， r 为等效火焰半径， t 为时间。为减小点火初期火焰核形成以及火焰接近燃烧室壁面时边界效应的影响，火焰传播速度分析主要采用火焰稳定向外传播阶段的数据。

图3给出了不同当量比下归一化湍流火焰传播速度 $(dr/dt)/(\sigma S_L)$ 随 $Re_{T,flame}$ 的变化。横坐标采用Chaudhuri等^[33, 34]基于湍流流场频谱分析定义的湍流火焰雷诺数。在该定义中，采用等效火焰半径表征火焰特征尺度，以描述膨胀火焰传播过程中的动态尺度变化。其具体计算公式为^[33, 34]：

$$Re_{T,flame} = \frac{u' \cdot r}{S_L \cdot \delta} \quad (9)$$

纵坐标为归一化湍流火焰传播速度，其中 dr/dt 表示由等效火焰半径变化率得到的火焰传播速度， σ 为热膨胀比， S_L 为层流燃烧速度。分别对 $\Phi < 1.0$ 、 $\Phi = 1.0$ 和 $\Phi > 1.0$ 三组当量比的实验数据进行归一化拟合。结果表明，随着湍流火焰雷诺数增大，湍流强度增大，归一化湍流火焰传播速度也随之增大，说明火焰的加速传播具有自相似性。

不同当量比下的拟合优度差异明显。 $\Phi < 1.0$ 、 $\Phi = 1.0$ 、 $\Phi > 1.0$ 时决定系数分别为 $R^2 = 0.78$ 、 $R^2 = 0.838$ 和 $R^2 = 0.700$ ，其中 $\Phi = 1.0$ 时拟合效果最好， $\Phi > 1.0$ 时最差。这表明在贫燃和富燃侧，仅考虑湍流火焰雷诺数不足以准确描述归一化湍流火焰传播速度的变化趋势，其原因可能是湍流混合过程强度过高，具体表现为 Da 较小。贫燃、化学计量和富燃侧的幂指数分别为0.355、0.197和0.454，表明在贫燃条件下湍流对湍流火焰传播的增强作用更显著。本文按照表1所示定义计算 Ka 和 Da ，以进一步表征湍流与火焰化学反应之间的尺度竞争关系。与化学计量和富燃侧相比，贫燃侧具有更大的 Ka 和更小的 Da 。因此，在拟合关联式中引入 Ka 和 Da ，以提高归一化湍流火焰传播速度的预测性能。

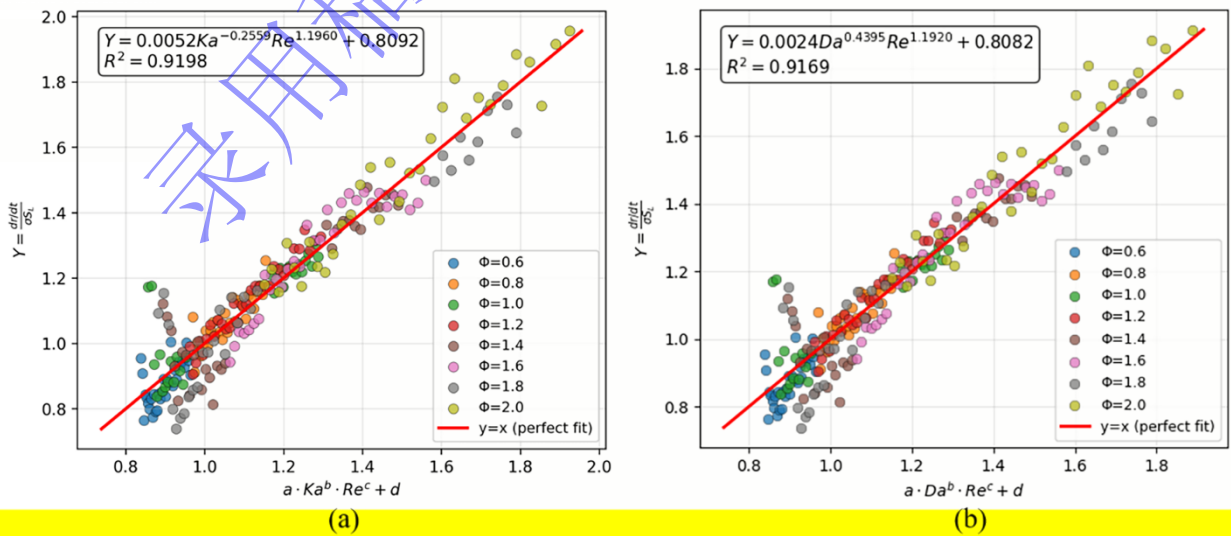


图 4 不同当量比和湍流强度下各模型对归一化湍流火焰传播速度 $(dr/dt)/(\sigma S_L)$ 的拟合性能: (a) Ka 主导模型;(b) Da 主导模型

Fig.4 Fitting performance of different models for the normalized turbulent flame propagation speed $(dr/dt)/(\sigma S_L)$ under various equivalence ratios and turbulence intensities: (a) the Ka -dominant model; (b) the Da -dominant model

图 4 给出了不同当量比和湍流强度下各模型对归一化湍流火焰传播速度的拟合性能。图 4(a)中模型形式为:

$$(dr/dt)/\sigma S_L = aKa^b \cdot (Re)^c + d \quad (10)$$

式中采用 Ka 主导模型, 拟合表达式为:

$$Y = 0.0052Ka^{-0.2559} Re^{1.1960} + 0.8092 \quad (11)$$

$R^2=0.9198$ 。随横坐标增大, 归一化湍流火焰传播速度逐渐增大。总体上拟合数据接近理想拟合线, 但部分数据仍存在波动。引入 Ka 后模型能够较好地描述不同当量比和湍流强度条件下归一化火焰传播速度的变化, 说明该模型能够提供合理的关联。图 4(b)中模型形式为:

$$(dr/dt)/\sigma S_L = aDa^b \cdot (Re)^c + d \quad (12)$$

式中采用 Da 主导模型, 拟合表达式为:

$$Y = 0.0024Da^{0.4395} Re^{1.1920} + 0.8082 \quad (13)$$

$R^2=0.9169$, 表明基于 Da 的关联模型同样能够较好地描述不同当量比和湍流强度下归一化湍流火焰传播速度的变化。结果表明, 不同当量比条件下的实验数据与理想拟合线吻合良好, 拟合性能较好。值得注意的是, 所有模型的 R^2 均高于 0.91, 说明基于 Ka 和 Da 的模型均能有效刻画归一化湍流火焰传播速度的变化规律。这表明火焰传播行为不仅受湍流强度影响, 还与湍流尺度和火焰化学反应尺度之间的相互作用密切相关。 Ka 和 Da 能够从不同时间尺度角度描述这种耦合作用, 因此具有较好的跨当量比关联能力。火焰传播过程进一步决定燃烧放热的时空演化, 并影响密闭空间内的压力增长。下一节将进一步考察湍流强度和当量比对爆炸超压及压力上升速率的影响。

3.3 爆炸超压生成

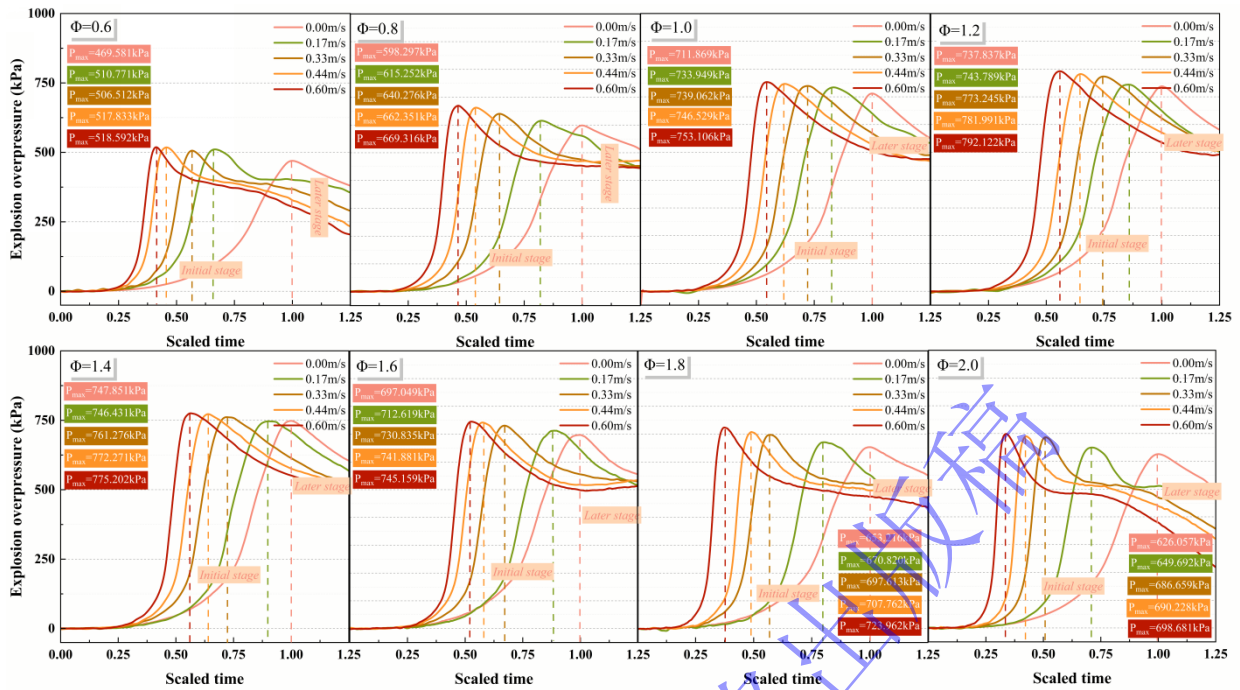


图5 当量比和外加湍流对乙烯爆炸超压的影响

Fig.5 Effect of equivalence ratio and external turbulence on ethylene flame explosion overpressure

图5给出了当量比和外部湍流对乙烯火焰爆炸超压的影响。实验超压可分为3个阶段：（1）恒压阶段；（2）压力上升阶段；（3）压力下降阶段。初始时刻，乙烯预混气体点燃后超压几乎不变，火焰周围大量未燃气体尚未受热，燃烧室内超压维持初始状态。随着反应进行，外围未燃混合气体受热膨胀，燃烧反应持续放热并引起燃烧产物体积膨胀，从而推动燃烧室内压力快速上升。当火焰前锋到达燃烧室壁面时，瞬时超压达到峰值。随后，高温燃烧产物通过辐射和传导向外散热，温度逐渐降低，反应瞬时超压也逐渐下降。总体而言，在 $\Phi=0.6\sim1.2$ 范围内，随着当量比增大，各湍流强度对应的峰值超压（ P_{max} ）逐渐增大，达到 P_{max} 所需时间逐渐缩短，在无外加湍流条件下，达到 P_{max} 所需时间缩短约60 ms。在 $\Phi=1.4\sim2.0$ 范围内，各湍流强度对应的 P_{max} 逐渐减小，达到 P_{max} 所需时间逐渐增长， $u'=0.00$ m/s时约增加30 ms。

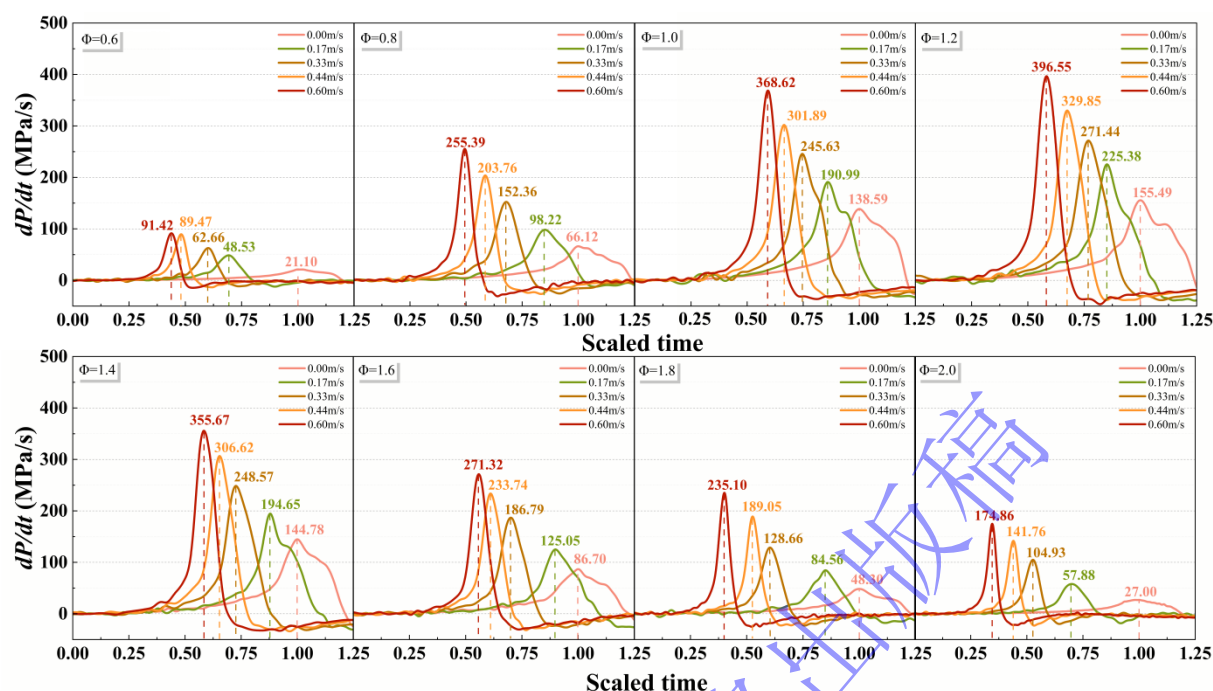


图 6 当量比和外加湍流对乙烯压力上升速率的影响

Fig.6 Effect of equivalence ratio and external turbulence on ethylene flame pressure rise rate

图 6 给出了当量比和外部湍流对乙烯火焰压力上升速率的影响。最大压力上升速率 $(dP/dt)_{\max}$ 随 u' 变化显著。相同当量比下，随着湍流强度增大，火焰传播速度提高，燃烧反应在更短时间内推进，从而使单位时间内的燃烧放热增强，导致 $(dP/dt)_{\max}$ 升高。如图 6 所示，当 $u'=0.60$ m/s、 $\Phi=0.6$ 时， $(dP/dt)_{\max}$ 的出现时间比层流条件提前约 50 ms。在 $\Phi=0.6\sim1.2$ 范围内，相同湍流强度下，随着当量比增大，燃料浓度持续升高，反应速率明显加快， $(dP/dt)_{\max}$ 逐渐变大，达到 $(dP/dt)_{\max}$ 所需时间缩短。在 $\Phi=1.4\sim2.0$ 范围内，由于层流燃烧速度逐渐降低，相同湍流强度对应的 $(dP/dt)_{\max}$ 逐渐减小，达到 $(dP/dt)_{\max}$ 所需时间增长。

为进一步分析爆炸过程中能量耗散对压力演化的影响，本文计算单位面积热损失 q 。热损失根据燃烧过程中体系能量变化进行估算，并结合燃烧室几何参数及未燃、已燃气体状态参数进行计算。其具体计算公式为^[35]：

$$q = \frac{V}{S} \frac{1}{\gamma_e - 1} (P_{\max, ad} - P_{\max}) \quad (14)$$

式中， S 为燃烧室内壁表面积， V 为燃烧室体积， γ_e 为已燃气的绝热指数， $P_{\max, ad}$ 是理论爆炸超压峰值，可用 $gaseq$ 计算得到， $P_{\max}$ 是实际的最大爆炸超压。

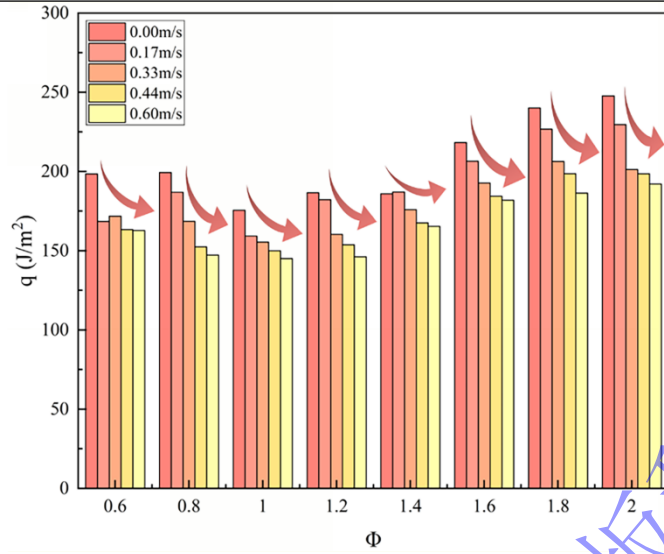


图 7 当量比和外加湍流对单位面积热损失的影响

Fig.7 Effect of equivalence ratio and external turbulence on heat loss per unit area

图 7 给出了不同外部湍流强度下单位面积热损失随当量比的变化。在相同燃烧室几何条件和计算方法下，对不同当量比及湍流强度工况进行对比。如图所示，任一湍流强度条件下， q 总体随当量比增大而增大。例如， $u'=0.00$ m/s 时， q 从 $\Phi=0.6$ 时的 198.4428 J/m² 增大到 $\Phi=2.0$ 时的 247.7892 J/m²，增幅约 24.6%。这表明随着当量比增加，爆炸过程中的热释放和壁面热负荷均有所增强，从而导致单位面积热损失增加。相反，在当量比相同的条件下，增大外部湍流强度可显著降低单位面积热损失。例如， $\Phi=2.0$ 时， q 从 0.00 m/s 时的 247.7892 J/m² 降至 0.60 m/s 时的 192.1030 J/m²，降幅约 22.2%。一方面，较高的湍流强度促进火焰传播并缩短高温燃烧产物在燃烧室内的停留时间；另一方面，火焰加速传播改变了高温产物与燃烧室壁面的热交换过程，从而降低了单位面积热损失。

综上，爆炸超压和压力上升速率表现出明显的湍流强度与当量比的耦合特征。湍流通过加快火焰传播、缩短压力快速增长阶段，并改变燃烧过程中的热量耗散，对爆炸压力演化产生综合影响。为进一步实现不同工况下爆炸超压时程的快速预测，下一节构建物理引导神经网络模型。

3.4 基于物理信息神经网络的超压预测模型

为建立能够准确捕捉上述复杂非线性演化的快速预测模型，本研究采用极端梯度提升 (Extreme Gradient Boosting, XGBoost) 与物理引导神经网络 (physics-guided neural network, PGNN) 相结合的策略。以极端梯度提升为代表的传统集成学习算法在各种非线性回归任务中表现优异，本研究将其作为基线模型，用于预测不同工况（湍流强度和当量比）下爆炸超压随时间的演化。为防止数据泄漏，采用基于工况的分组 K 折交叉验证进行模型评估。然而，纯数据驱动模型主要拟合特征与目标值在数学空间中的统计映射，缺乏对爆炸动力学底层物理规律的认知^[36]，其预测结果受到训练数据分布的限制，对爆炸过程中的初始条件、峰值特征及压力演化规律缺乏显式物理约束。例如，在点火起始时刻 ($t=0$) 预测出非零初始超压，或在压力波衰减阶段预测出负超压 ($P<0$)。这种物理不一致性严重限制了纯数据驱动模型在乙烯处理设施实际安全评估中的可靠性。

为修正上述非物理预测行为，构建了 PGNN 预测模型。其核心思想是：在不改变神经网络基本多层感知机架构的前提下，以“软约束”的形式将爆炸领域的先验物理知识嵌入模型损失函数^[36]。

所提出的物理信息神经网络接受 3 个输入特征：湍流强度、当量比和时间。网络由输入投影层（将三维特征映射到 256 维潜在空间）和 3 个残差块 (Residual Block) 组成，每个残差块包含两个全连接层，采用 Tanh 激活和 Dropout 正则化 (rate=0.05)。处理后的特征经 128 维中间层映射到最终的超压输出。为保证模拟爆炸波连续演化的数学平滑性并避免梯度消失问题，所有隐藏层均采用双

曲正切 (Tanh) 激活函数。为加快收敛并消除量纲差异, 输入特征和超压目标值均采用标准化处理 (StandardScaler)。模型使用 Adam 优化器训练, 初始学习率为 0.001, 并结合余弦退火学习率调度器在 5000 个 epoch 内训练, 以确保稳定收敛到全局最小值。

所提预测模型的综合损失函数 L 由数据损失 (Data Loss) 和物理损失 (Physics Loss) 两部分组成:

$$L_{total} = L_{data} + \lambda_{IC} L_{IC} + \lambda_{peak} L_{peak} + \lambda_{smooth} L_{smooth} \quad (15)$$

其中, 数据损失采用均方误差 (mean squared error, MSE) 量化缩放空间内模型预测超压与实验测量值之间的残差; λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为 3 个物理约束的自适应权重系数, 依据经验分别设为 1.0、1.0 和 0.05。为避免不同物理约束因量纲和数值范围不同而对训练过程产生不均衡影响, 物理约束均在标准化后的数据空间中进行计算, 并通过 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 调节各约束项的相对贡献。针对爆炸超压的时间演化规律, 物理损失引入以下 3 条常识性物理约束准则:

(1) 初始条件 (initial condition constraint, IC) 约束: 在实际物理场景中, 点火瞬间的超压应严格为零。模型对 $t=0$ 时网络输出与 0 kPa 之间的偏差施加强制惩罚^[36]:

$$L_{IC} = \frac{1}{N_{IC}} \sum_{i=1}^{N_{IC}} [P(X_i, t=0) - 0]^2 \quad (16)$$

(2) 峰值约束: 爆炸超压曲线的峰值区域具有重要工程意义。模型对峰值区域的预测误差施加指数加权惩罚, 以提高最大超压及其出现时间的预测精度:

$$L_{peak} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \cdot [P(X_i, t_i) - P_{exp}(X_i, t_i)]^2, w_i = \exp(2.0 \cdot \tilde{P}_{exp,i}) \quad (17)$$

其中, 权重 w 随归一化实验超压呈指数增大, 引导模型更加关注峰值区域的拟合精度。

(3) 平滑性约束: 作为连续物理场的演化结果, 超压时程曲线应满足一定的平滑性要求。模型通过对相邻时间步预测之间的一阶差分施加惩罚来抑制非物理振荡^[37]:

$$L_{smooth} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\hat{P}_{i+1} - \hat{P}_i)^2 \quad (17)$$

在计算物理损失时, 所有输入特征和目标值均经过严格的缩放映射校验, 以消除特征归一化造成的物理边界值错位假象。为严格评估模型的工程实用价值, 本研究采用“留一工况”划分原则, 将特定湍流强度与当量比组合的完整时间序列数据整体作为验证集和测试集, 从而彻底防止同一工况数据在训练与测试过程中交叉造成的数据泄漏。

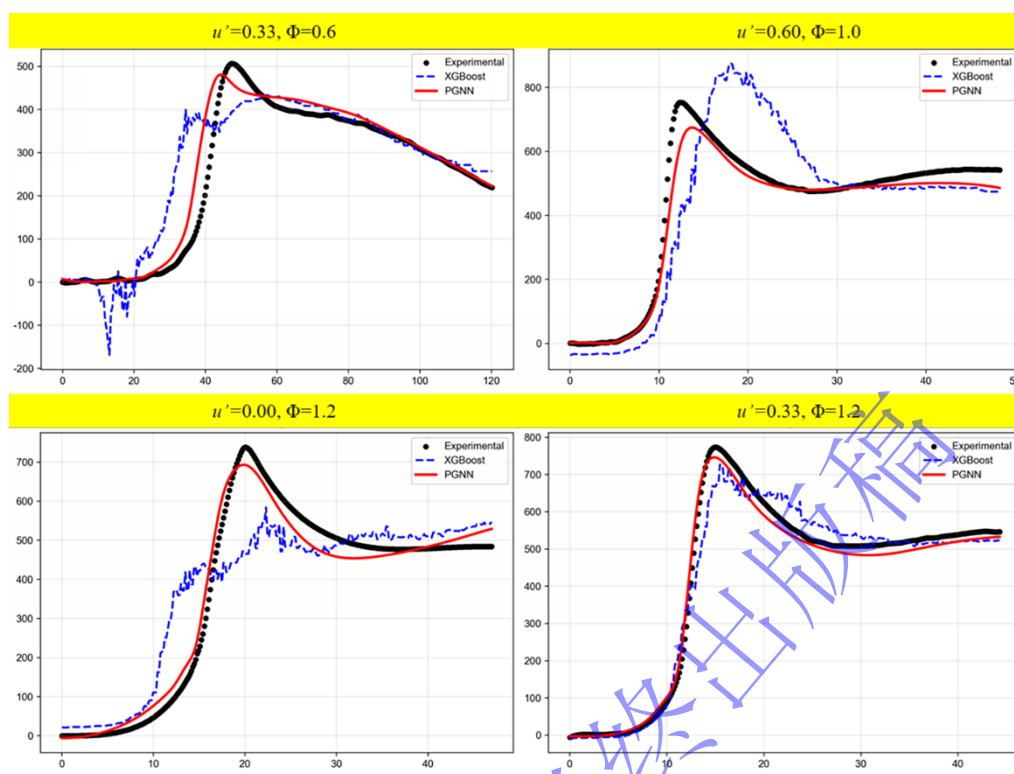


图 8 XGBoost 和 PGNN 模型预测超压曲线与实验数据的对比

Fig.8 Comparison of overpressure profiles predicted by XGBoost and PGNN models against experimental data

图 8 给出了 XGBoost 基线模型和 PGNN 模型预测超压曲线与实验数据的对比。预测结果表明，融合物理先验的神经网络模型不仅能够有效改善 XGBoost 模型在 $t=0$ 时刻和尾部衰减阶段的非物理波动，而且在关键工程指标预测精度上也有显著提升。在预测高湍流强度等未见外推工况时，PGNN 模型的峰值超压预测误差和时程曲线整体吻合度均明显优于纯数据驱动模型^[38]。在压力衰减阶段，模型更符合能量耗散规律，超压冲量的积分计算结果更接近实验值。综上，受简单物理先验约束的神经网络模型仅以较低的计算成本，就有效弥合了高精度机器学习与严格物理常识之间的差距；它不仅具有机器学习的高效计算性能，还保留了爆炸动力学的基本物理属性，可为受限空间内乙烯爆炸的安全预警提供可靠的数值支撑。上述实验和建模结果共同揭示了外部湍流与乙烯爆炸特性之间的复杂相互作用。结合火焰形态、传播速度、压力演化及模型预测结果，可进一步总结外加湍流作用下乙烯爆炸特性的主要规律。

4 结论

本研究在定容燃烧弹中系统考察了外部湍流强度对预混乙烯-空气混合物爆炸特性的影响，主要结论如下：

- (1) 湍流强度显著改变火焰形态。增大 u' 促进火焰表面褶皱并提高火焰传热效率，在 $u'=0.44\sim0.60$ m/s 范围内增强效应最明显。火焰形态演化对当量比具有强依赖性，在贫燃至化学计量比范围 ($\Phi=0.6\sim1.0$) 内会发展出复杂褶皱结构，而富燃条件 ($\Phi=1.2\sim2.0$) 下火焰传播减慢。
- (2) 归一化湍流火焰传播速度随湍流火焰雷诺数增大呈现自相似行为。基于 Ka 和 Da 的模型均能有效刻画火焰加速过程， R^2 均高于 0.91。结果表明，湍流与火焰化学反应之间的尺度竞争是影响火焰传播的重要因素，且湍流对贫燃条件 ($\Phi<1.0$) 下火焰传播的增强作用更明显。
- (3) 爆炸超压和压力上升速率同时受湍流强度和当量比的强烈影响。在 $\Phi=0.6\sim1.2$ 范围内，

增大 Φ 使峰值超压升高、压力上升加快,而在富燃区 ($\Phi=1.4\sim 2.0$) 趋势相反。较高的湍流强度缩短了达到峰值超压和最大压力上升速率的时间,并改变爆炸过程中的热量耗散,使单位面积热损失降低。

(4) 融合初始条件、峰值和平滑性约束的物理引导神经网络 (PGNN) 模型能够有效改善纯数据驱动模型在初始阶段和压力衰减阶段出现的物理不一致预测,并在预测性能上优于 XGBoost 模型。该方法为湍流环境中爆炸超压演化的预测提供了可靠且计算高效的工具。

总体而言,上述研究结果为湍流增强的乙烯爆炸危害提供了定量认识,并为乙烯相关工业过程的风险评估和安全设计提供了稳健的预测框架。研究所得的湍流强度—火焰传播—爆炸压力之间的关联关系,可为受限空间内乙烯爆炸危险性评估及安全防护参数设计提供参考。未来工作将把 PGNN 框架拓展到更复杂的几何结构和多组分燃料系统。

致谢: 感谢国家自然科学基金 (52274178、52474211)、中央引导地方科技发展资金 (2025JH6/101000001)、中央高校基本科研业务费 (DUT25Z2719) 以及中国石油天然气集团有限公司科技项目 (2024DJ92) 的资助。

参考文献

- [1] BIN NAQYAH A S, AL-RABIAH A A. Development and intensification of the ethylene process utilizing a catalytic membrane reactor [J]. ACS omega, 2022, 7(32): 28445–58. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03130>.
- [2] ADUSUMILLI S, SEITZMAN J. Laminar flame speed measurements of ethylene at high preheat temperatures and for diluted oxidizers [J]. Combustion and Flame, 2021, 233: 111564–. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111564>.
- [3] WANG C, ZHAO Y, ZHANG B. Numerical simulation of flame acceleration and deflagration-to-detonation transition of ethylene in channels [J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2016, 43: 120–6. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.05.008>.
- [4] MOVILEANU C, GOSA V, RAZUS D. Explosion of gaseous ethylene–air mixtures in closed cylindrical vessels with central ignition [J]. Journal of hazardous materials, 2012, 235: 108–15. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.028>.
- [5] CRAVEN A, FOSTER M. The limits of flammability of ethylene in oxygen, air and air-nitrogen mixtures at elevated temperatures and pressures [J]. Combustion and Flame, 1966, 10(2): 95–100. [https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-2180\(66\)90054-X](https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-2180(66)90054-X).
- [6] MOVILEANU C, RAZUS D, GIURCAN V, et al. Pressure evolution of ethylene-air explosions in enclosures [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 530(1): 012014. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1088/1742-6596/530/1/012014>.
- [7] GIURCAN V, RAZUS D, MITU M, et al. Dynamics of Pressure Variation in Closed Vessel Explosions of Diluted Fuel/Oxidant Mixtures [J]. Processes, 2022, 10(12): 2726. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.3390/pr10122726>.
- [8] FABIANO B, PISTRITTO F, REVERBERI A, et al. Ethylene–air mixtures under flowing conditions: a model-based approach to explosion conditions [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2015, 17(5): 1261–70. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1007/s10098-015-0966-1>.
- [9] HAMID M D, MASRAN N A B, JOO K B H, et al. Simulation study on the flame acceleration of premixed hydrocarbons/air mixtures in tee pipes [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2026, 1598(1): 012067. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1088/1755-1315/1598/1/012067>.

- [10] BANG B-H, PARK C, YOON S S, et al. Numerical modeling for turbulent diffusion torch of flammable gas leak from damaged pipeline into atmosphere [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 173: 934–45. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.044>.
- [11] ZHAO H, YUAN C, LI G, et al. The Propagation Characteristics of Turbulent Expanding Flames of Methane/Hydrogen Blending Gas [J]. *Energies*, 2024, 17(23): 5997. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.3390/en17235997>.
- [12] ZHANG H, TAN Y, ZHANG S, et al. Effects of initial turbulence on the explosion limit and flame propagation behaviors of premixed syngas–air mixtures [J]. *ACS omega*, 2021, 6(46): 30910–8. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02513>.
- [13] CHENG J, ZHANG B. Characteristics of flame acceleration and deflagration-to-detonation transition enhanced by SF₆ jet-in-cross-flow/flame interaction [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 140: 108451. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108451>.
- [14] VAN TREET L, ROTH N, SEIDEL L, et al. Measurements of the laminar burning velocities of rich ethylene/air mixtures [J]. *Fuel*, 2020, 275: 117938. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117938>.
- [15] WANG L, HOU R, ZHANG Z, et al. Laminar flame speed measurement and combustion mechanism optimization for ethylene–air mixtures [J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2024, 19(4): e3060. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1002/apj.3060>.
- [16] MA S, ZHANG X, DMITRIEV A, et al. Revisit laminar premixed ethylene flames at elevated pressures: A mass spectrometric and laminar flame propagation study [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 230: 111422. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111422>.
- [17] LIU B, HU E, YIN G, et al. Experimental and kinetic study on laminar burning velocities of ammonia/ethylene/air premixed flames under high temperature and elevated pressure [J]. *Combustion and flame*, 2023, 251: 112707. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.112707>.
- [18] KIM H J, VAN K, LEE D K, et al. Laminar flame speed, Markstein length, and cellular instability for spherically propagating methane/ethylene–air premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 214: 464–74. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.01.011>.
- [19] HUO J, SHU T, REN Z, et al. Extrapolation of Laminar Ethylene/Air Flame Speeds at Elevated Pressures with Flame Chemistry Analysis [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2019, 35(2): 424–31. <https://dx.doi.org/10.2514/1.B37185>.
- [20] WANG K, SU M, WEI L, et al. Effect of initial turbulence on explosion behavior of stoichiometric methane-ethylene-air mixtures in confined space [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 161: 583–93. <https://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.072>.
- [21] CAO Y, LI B, GAO K. Pressure characteristics during vented explosion of ethylene-air mixtures in a square vessel [J]. *Energy*, 2018, 151(MAY15): 26–32. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.012>.
- [22] PEKALSKI A, ZEVENBERGEN J, BRAITHWAITE M, et al. Explosive decomposition of ethylene oxide at elevated condition: effect of ignition energy, nitrogen dilution, and turbulence [J]. *Journal of hazardous materials*, 2005, 118(1-3): 19–34. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.09.029>.
- [23] SUN S, WANG M, QIU Y, et al. Study of flame propagation in an external space under vented explosion conditions [J]. *Energy*, 2019, 178: 186–94. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.137>.

- [24] AMYOTTE P R, PATIL S, PEGG M J. Confined and Vented Ethylene/Air Deflagrations at Initially Elevated Pressures and Turbulence Levels [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2002, 80(2): 71–7. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1205/095758202753553185>.
- [25] RAZUS, D., GOSA, et al. Propagation of ethylene-air flames in closed cylindrical vessels with asymmetrical ignition [J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers Process Safety & Environmental Protection Part B*, 2015. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.05.008>.
- [26] 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. <https://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117610>.
- [27] WANG T, LUO Z, WEN H, et al. The explosion enhancement of methane-air mixtures by ethylene in a confined chamber [J]. *Energy*, 2021, 214: 119042. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119042>.
- [28] QI C, LV X, WANG Y, et al. Effects of ethylene addition and dilution on the explosion characteristics of ethane-ethylene mixtures [J]. *Energy*, 2023, 280: 128047. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128047>.
- [29] LIANG B, GAO Y, ZHANG K, et al. Effects of initial pressure, turbulence intensity and equivalence ratio on ammonia-air turbulent flame dynamics [J]. *Combustion and Flame*, 2026, 289: 115006. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2026.115006>.
- [30] XIAO H, HE X, DUAN Q, et al. An investigation of premixed flame propagation in a closed combustion duct with a 90° bend [J]. *Applied Energy*, 2014, 134: 248–56. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.071>.
- [31] SUN Z-Y, LIU F-S, BAO X-C, et al. Research on cellular instabilities in outwardly propagating spherical hydrogen-air flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(9): 7889–99. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.011>.
- [32] WANG Y, YU J, YAN X, et al. Deflagration characteristics of N₂ diluted propanal/air mixtures at elevated pressures [J]. *Combustion and Flame*, 2024, 265: 113491. <https://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113491>.
- [33] CHAUDHURI S, WU F, ZHU D, et al. Flame speed and self-similar propagation of expanding turbulent premixed flames [J]. *Physical review letters*, 2012, 108(4): 044503. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.044503>.
- [34] CHAUDHURI S, WU F, LAW C K. Scaling of turbulent flame speed for expanding flames with Markstein diffusion considerations [J]. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2013, 88(3): 033005. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1103/physreve.88.033005>.
- [35] MITU M, GIURCAN V, RAZUS D, et al. Propagation indices of methane-air explosions in closed vessels [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 47: 110–9. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.03.001>.
- [36] 张世红, 张弛, 王柏森. 物理信息神经网络代理求解燃烧反应动力学 [J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(6): 1872–81.
- [37] ZHANG S, ZHANG C, WANG B. CRK-PINN: A physics-informed neural network for solving combustion reaction kinetics ordinary differential equations [J]. *Combustion and Flame*, 2024, 269: 113647. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113647>.
- [38] ZHANG H-Y, XU Y-X, GAO S-P, et al. On the prediction of the peak overpressure of ground reflected wave using a physics-informed weighted neural network [J]. *Energetic Materials Frontiers*,

2026. <https://dx.doi.org/10.1016/j.enmf.2026.04.004>.

录用稿件，
非最终出版稿