

自燃着火与火焰传播的判别方法研究综述

张璇, 刘海峰, 尧命发

(天津大学先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在新型低温燃烧模式中, 大多存在自燃着火和火焰传播共存的现象, 但二者之间的相互作用机制尚且不明。鉴于此, 从实验和数值模拟两方面回顾了国内外关于自燃和火焰传播的判别方法, 总结了各种方法的特点及适用范围, 并对数值模拟中的速度判定、 Da 数判定和 CEMA 判定 3 种方法进行了重点介绍。在未来, 将机器学习和图像处理技术应用于燃烧诊断领域, 有望实现自燃着火和火焰传播的定量和定性判断, 明晰两者之间的作用机制, 为新型燃烧模式中燃烧过程的调控提供理论指导。

关键词: 自燃着火; 火焰传播; Da 数; 化学爆炸模式分析; 速度

中图分类号: TK401

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)02-0188-09

Review of Identification Methods for Spontaneous Ignition and Deflagration

Zhang Xuan, Liu Haifeng, Yao Mingfa

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Spontaneous ignition and deflagration coexist in most of novel low-temperature combustion modes, but the interaction mechanism between the two remains unclear. In light of this, a comprehensive review of identification methods for spontaneous ignition and deflagration is conducted from both experimental and numerical simulation perspectives, covering both domestic and international research. Various approaches are summarized in terms of their characteristics and applicability, with particular emphasis placed on three key methods: velocity-based method, Damköhler number-based method, and CEMA (chemical explosive mode analysis) method, thereby providing a theoretical foundation for regulating combustion reaction rates in engines. In the future, the application of machine learning and image processing techniques in the field of combustion diagnostics is expected to realize the quantitative and qualitative assessment of spontaneous ignition and deflagration, and elucidate the interaction mechanisms between the two, which aims to provide theoretical guidance for regulating the combustion process in novel combustion modes.

Keywords: spontaneous ignition; deflagration; Da number; CEMA; speed

碳中和已成为全球共识和未来发展目标, 因此, 新能源将会在未来三十年快速增加, 但石油液体燃料

仍是重要来源, 并且交通运输中内燃机是其主要消费端, 2021 年全球道路交通排放了约五分之一的温室

收稿日期: 2024-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金委交叉学部专项基金资助项目(T2341001); 国家自然科学基金委叶企孙联合基金资助项目(U2241262).

作者简介: 张璇(1999—), 女, 硕士研究生, xuan_zhang@tju.edu.cn.

通信作者: 刘海峰, 男, 博士, 教授, haifengliu@tju.edu.cn.

气体^[1]. 为满足碳中和要求, 发动机必须突破碳中和燃料的燃烧技术, 实现高效低碳/零碳燃烧.

纵观内燃机的发展历程可以发现, 其一直围绕着排放和热效率两个关键命题. 1979 年 Onishi 等^[2]提出了均质压燃(HCCI)技术, 该技术结合了汽油机和柴油机的特点, 具有高效、低 NO_x 排放等特点, 受到广大学者的青睐. Hultqvist、Johansson 和 Drake 等^[3-5]的化学发光成像和平面激光诱导荧光的实验表明 HCCI 和传统汽油机燃烧特性有明显区别, 汽油机燃烧方式是以火焰传播为特征的预混合燃烧, 而 HCCI 燃烧过程则以多点自燃为主, 自燃核以火焰传播的方式生长. 这种多点自燃的均质预混合气燃烧反应速度过快, 难以控制, 负荷受限, 这限制了 HCCI 在发动中的应用. 为此, 国内外研究人员尝试了各种不同的技术方法, 发展新型燃烧模式, 如部分预混压燃(PPC)、反应活性控制压燃(RCCI), 通过控制喷油策略和燃料活性来实现缸内的燃料浓度或活性分层, 在一定程度上解决了 HCCI 发动机燃烧相位和燃烧速率控制难题.

与 HCCI 多点自燃着火不同, 通过光学诊断发现 PPC 和 RCCI 燃烧过程中自燃和火焰传播共存的现象. Zheng 等^[6]通过在光学发动机上研究 PPC 模式下不同的浓度分层, 发现对于 PPC 燃烧模式, 缸内混合气浓度分层越小, 燃烧过程中自燃比例越高; 反之, 则火焰传播占比越高. Brands 等^[7]在-300° CA ATDC(压缩上止点后)曲轴转角下喷射异辛烷时, 发现燃烧过程主要由顺序自燃主导, 当喷油时刻推迟到-100° CA ATDC 时, 火焰发展速度变慢. Tang 等^[8]发现对于 RCCI 燃烧模式, 缸内直喷燃料活性的比例会影响自燃和火焰传播的比例. 刘海峰等^[9]的研究指出 PPC 和 RCCI 实现更高负荷下高效清洁燃烧的本质: 通过浓度和活性分层来调控缸内自燃和火焰传播所占的比例, 从而实现燃烧反应速率的可控性, 并拓展高效清洁运行的范围.

为了深入理解自燃和火焰传播的机制, 燃烧学界也开展了一些数值模拟的工作. 在早期研究中, 根据所观察到的实验现象结合零维的计算, 发现两者在温度梯度、标量耗散率、传播速度上等的特征, 并基于此提出了一些判定方法. 如 Gu 等^[10]在 Zeldovich 理论的基础上, 通过测试混合气体的局部温度梯度、临界温度梯度和声速以定量识别反应前沿的点火模式. 而随着计算机的容量和计算速度的提高, 通过直接数值模拟(DNS), 人们可以获取更加详细准确的数据, 对之前的判定方法进行拓展, 并提出了一些新的判定方法, 如 Lu 等^[11]提出的 CEMA (chemical explo-

sive mode analysis)方法.

通过识别自燃着火和火焰传播, 可以研究不同时刻不同点火模式对燃烧后放热的影响, 对燃烧相位和放热率的调控提供针对性的指导. 本文基于自燃着火和火焰传播的特征, 对国内外研究人员在实验和数值模拟中所使用的判定方法进行分析整理, 并在此基础上, 对未来判定方法的发展进行了展望.

1 数值判别准则

火焰传播是预混火焰在反应层中的反应和扩散过程之间保持平衡, 受物质的导热和扩散作用驱动; 自燃着火是存在温度/浓度梯度的情况下由化学驱动的相邻混合物的连续爆炸. 在开发合理的数值诊断方法以识别和分析各种点火模式和其之后的燃烧过程中, 关于两者的特征有了深入的理解. 如 Zeldovich^[12]提出, 在一维燃烧系统中, 火焰锋面速度与滞燃期的空间梯度呈反比, 自燃着火和火焰传播取决于滞燃期的空间梯度. Chen 等^[13]对 Zeldovich 的理论进行补充, 发现在只有热分层存在时, 滞燃期与初始温度梯度呈反比, 并指出火焰锋面速度对温度梯度的弱敏感性是火焰传播的明显特征. 此外, Luong 等^[14]对火焰传播的放热量进行分析, 证实了火焰传播模式有利于燃烧持续期的延长并缓和总体放热率. El-Asrag 等^[15]研究了热分层对 DME/空气混合物的影响. 结果表明, 自燃着火具有低标量耗散率、高位移速度火焰前锋和高 Damköhler (Da 数)的特点, 而火焰传播模式则与之相反. 基于以上研究, 对自燃着火和火焰传播的特征进行总结(见表 1).

表 1 自燃着火和火焰传播的特征

Tab.1 Characteristics of spontaneous ignition and deflagration

| 自燃着火的特征 | 火焰传播的特征 |
|----------------------------|-----------------------|
| 化学反应驱动, 相邻混合物的连续爆炸, 化学反应主导 | 导热、物质的扩散作用驱动, 反应-扩散平衡 |
| 高火焰锋面速度 | 低火焰锋面速度 |
| 低混合标量耗散率 | 高混合标量耗散率 |
| 低温度梯度 | 高温温度梯度 |
| 滞燃期长, 放热率高, 控制困难 | 滞燃期短, 放热平缓, 发动机发动平稳 |
| 未燃区和已燃区的边界较模糊, 不易辨认 | 未燃区和已燃区的界限清晰 |
| 对初始条件的依赖性高, 特别是初始温度 | 对初始条件的敏感性低 |

1.1 速度判定

在火焰传播中, 反应锋面传播由反应和扩散传输之间的平衡决定, 这意味着反应锋面以层流火焰速度

传播. 在自燃着火区域, 反应锋面的表观传播是由一系列点火事件引起的, 因此反应锋面通常以更高的速度传播, 并通过实验进行了验证. Persson 等^[16]使用火焰自发光高速摄像技术研究了 HCCI 燃烧过程中的火焰发展过程, 结果显示 HCCI 中火焰传播速度在 100 m/s 左右, 远高于点燃式发动机中的火焰传播速度 (低于 10 m/s). 于是 Chen 等^[13]提出将火焰锋面的位移速度 S_d^* 与参考层流火焰速度 S_L 进行比较, 以区分点火模式. 一维测试表明, 在相应的局部焓和压力条件下, 火焰传播状态下的前沿速度非常接近层流火焰速度, 故将边界值设为 1.1. 若 $S_d^*/S_L > 1.1$, 为自燃着火, 反之为火焰传播. S_d^* 定义为^[17]:

$$S_d^* = \frac{1}{\rho_u |\nabla Y_k|} \left(\dot{\omega}_k - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho Y_k V_{j,k}) \right) \quad (1)$$

式中: Y_k 、 $V_{j,k}$ 和 $\dot{\omega}_k$ 分别表示物质 k 的质量分数、 j 方向的扩散速度和净生产率; ρ_u 是未燃烧混合物的密度, 通过 $Y_C = Y_{CO_2} + Y_{CO}$ 来确定火焰锋面的位置.

但是该方法目前还存三大问题, 一是如果混合物同时具有温度分层和浓度分层, 则很难确定参考层流火焰速度, 而新型燃烧模式在燃烧过程中多存在温度分层、浓度和活性分层. 二是在高度瞬态的湍流介质中使用未拉伸的稳定预混火焰速度作为参考是不合理. 最后, 如果反应前沿不垂直于自身传播, 则该标准失效, 此时, 位移速度无法正确表示火焰锋面的速度.

Sankaran 等^[18]提出可以将该速度判定方法用于实验, 发现大量实验和模拟数据显示点火模式与初始热力学状态密切相关, 并提出了基于火焰锋面的传播速度 S_{sp} 和层流火焰速度 S_L 的预测性判据 (以下简称为桑卡兰准则) 为

$$\begin{cases} S_a = \beta \frac{S_L}{S_{sp}} \\ S_{sp} = \frac{1}{|\nabla \tau_{ig}|} \\ S_a = \beta S_L \left| \frac{d\tau_{ig}}{dT} \nabla T \right| \end{cases} \quad (2)$$

式中: β 的取值范围为 0~1, 在该文献中取 0.5; $\nabla \tau_{ig}$ 为滞燃期梯度场; ∇T 为温度梯度场; $d\tau_{ig}/dT$ 为滞燃期对温度的导数. 当 $S_a > 1$ 时, 对应火焰传播模式; 当 $S_a < 1$ 时, 则对应自燃着火模式.

但在实际设备中预计会出现更高层次的湍流, 于是 Im 等^[19]对 Sankaran 的工作进行拓展, 同时考虑湍流和温度分层的影响, 见图 1. 通过尺度分析提出可以根据反应混合物的热化学性质、初始流动及标量

场条件来预测点火模式. 并将点火方式分为三类: ①以扩散为主的弱点火; ②以反应为主的强点火; ③混合为主的强点火. 其中强点火对应的是小温度梯度、短滞燃期的自燃. 并结合系统的特征 Da 数、Reynolds 数的湍流流动和标量特性, 对 Zeldovich 理论进行拓展, 指出决定点火模式的主要因素是 Da , 而 Re 则进一步修正了条件.

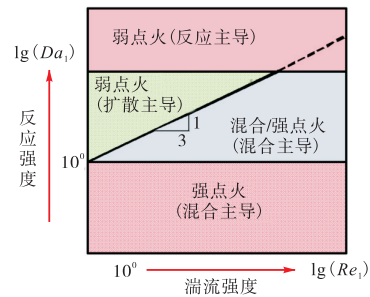


图 1 温度分层条件下近均质混合物的点火行为^[19]
Fig.1 Regime diagram for strong and weak ignition for nearly homogeneous reactant mixture with temperature fluctuations^[19]

之后, Luong 等^[20]通过 2D-DNS (2 维直接数值模拟) 在温度和浓度分层同时存在的情况下对混合物点火模式进行预测, 将滞燃期的梯度场公式进行更新, 如公式 (3) 所示, 进一步丰富了 Im 理论.

$$|\nabla \tau_{ig}| = \left| \frac{\partial \tau_{ig}}{\partial T} \nabla T + \frac{\partial \tau_{ig}}{\partial \phi} \nabla \phi \right| \quad (3)$$

式中: $\partial \tau_{ig} / \partial T$ 和 $\partial \tau_{ig} / \partial \phi$ 分别为滞燃期对温度和当量比的偏导.

此外, 根据桑卡兰准则, Karimkashi 等^[21]在 RCCI 发动机上研究活性分层对甲醇/正十二烷燃料的燃烧过程的影响, 分析得出边界曲线的解析表达式, 并提出可以通过 S_a 曲线来区分火焰传播和自燃. 同时考虑点火和火焰传播时间尺度, 通过求解扩散方程, 成功将 Zeldovich 理论扩展到了瞬态条件. Walton 等^[22]则将滞燃期的梯度分解为热梯度 (dT/dx) 和热灵敏度 ($d\tau_{ig}/dT$) 的乘积, 进而得到公式:

$$\frac{d\tau}{dT} < \left(\frac{dT}{dx} S_L \right)^{-1} \quad (4)$$

若该不等式为真, 则为强点火 (即自燃着火); 若不等式为假, 则发生混合点火或弱点火. 统计发现在快速压缩设备中的典型热梯度预计约为 5 K/mm, 但是该典型热梯度值与燃料的种类和工况相关. 如在 Mansfield 等^[23-24]对合成气的研究中发现临界温度梯度为 3~5 K/mm, 而对异辛烷的研究中该值则为 5~10 K/mm. 但是 Martz 等^[25]在其研究中指出, 任何基于温度梯度的状态识别方法都可能导致很大程度的

不确定性. 但总的来说, 该方法进一步表明了桑卡兰准则的可行性.

2012 年 Strozzì 等^[26]首次将桑卡兰准则用于实验, 发现在仅考虑温度分层时, 燃烧初期的计算结果与实验数据吻合较好. 在燃烧的中间阶段会高速自燃着火的占比, 而对于燃烧的后期阶段, 由于自燃着火和火焰传播在空间和时间上的竞争, 很难得出一致的结论. 该研究证实了桑卡兰准则有望用于实验中进行自燃着火和火焰传播的定量判定, 但是该准则的准确性有待进一步提高, 适用范围有待进一步拓展.

1.2 Da 数判定

确定自燃着火和火焰传播的判别标准来自于对实验现象的观察和微观机制的分析, 自燃着火和火焰传播的本质区别是驱动力, 自燃着火是化学反应驱动, 相邻混合物的连续爆炸, 化学反应主导; 而火焰传播则是导热、物质的扩散作用驱动, 存在反应-扩散平衡. 基于此, 提出比较扩散和反应的相对优势来区分点火模式.

为了揭示 HCCI 发动机中的燃烧机理, Chen 等^[13]应用 Budget terms 方法探讨了在定容条件下存在温度分层时氢气的燃烧过程. 通过对比 H_2 组分输运方程中反应项和扩散项的相对大小, 从而评估扩散对反应在确定火焰前沿传播机制中的相对重要性, 若反应项占主导, 对应自燃着火模式; 若反应项与扩散项相当, 则为火焰传播模式.

$$\frac{DY_{H_2}}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \rho D_{H_2} \frac{\partial Y_{H_2}}{\partial x_i} + \frac{\dot{\omega}}{\rho} \quad (5)$$

式中: 右侧第 1 项表示扩散项, 第 2 项表示反应项; D_{H_2} 为 H_2 的扩散系数; $\dot{\omega}$ 为反应速率.

张帆等^[27]在 3D(三维)-DNS 中, 通过计算扩散速率和化学反应速率, 使用 Budget terms 的方法(该文献忽略了未燃气体密度和组分浓度梯度的变化)分析证实了汽油 PPC 工况下火焰传播的存在. 发现在图 2 所示的反应锋面, 庚烷的扩散速率和化学反应速度几乎在同一个量级, 说明该反应锋面发生的是火焰传播过程, 存在火焰传播区域. 图 2 所示的反应锋面为自燃过程.

为实现自燃着火和火焰传播的量化判定, 2011 年, 美国密歇根大学的 Bansal 和 Im^[28]对低温燃烧(LTC)发动机环境下的自燃特性和火焰传播特性进行了计算研究, 进一步提出了临界 Da 数判定的方法. 具体判定流程如下^[29]: 首先针对特定工况建立一维 DNS, 计算扩散极限处对应的 Da 数, 将其作为临界值, 记为 Da_0 , 再将其应用于所研究的二维或三维

DNS 模拟中, 当某一位置处 Da 数 $> Da_0$, 表明反应项大于扩散项, 为自燃着火; 反之属于火焰传播. 扩散极限是指完全没有自燃着火, 只有火焰锋面传播的情况.

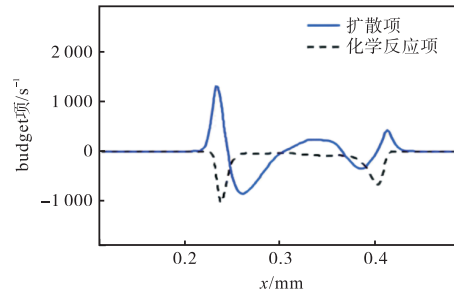


图 2 C_7H_{16} 组分的扩散项与化学反应项的一维空间的分布^[27]

Fig.2 Diffusion and reaction in terms of n-heptane in one dimensional distribution^[27]

$$Da = \frac{\text{反应项}}{\text{扩散项}} = \frac{|\dot{\omega}_k|}{|\nabla \cdot (\rho D_k \nabla Y_k)|} \quad (6)$$

其中下标 k 是人为选取的关键组分, 常选取一维层流火焰结构中放热率空间分布最吻合的组分.

在 Bansal 等^[28]的研究中, 选取 HO_2 作为关键组分, 定义了基于 HO_2 组分的 Da 数 (Da_{HO_2}). Da_{HO_2} 表示锋面内 HO_2 的正反应峰和扩散峰值的比值, Da_{HO_2} 范围用于指示不同的燃烧模式: ① $Da_{HO_2} < 0.4$, 表示猝熄预混火焰; ② $0.4 < Da_{HO_2} < 1.4$, 表示预混火焰传播; ③ $Da_{HO_2} > 1.4$, 表示自燃着火传播.

作者指出, 0.4 和 1.4 是否适用于其他研究有待商榷, 但在当前的研究中选择其他值也会导致定性一致的结果. 在另一项 DNS 的研究中, Su 等^[30]分析了温度和组分分层对二甲醚(DME)着火特性的影响, 考虑到 DME 表现出双阶段放热的特征, 作者在低温放热阶段和高温放热阶段分别选用 Y_{OH+HO_2} (低温阶段) 和 Y_H (高温阶段) 来追踪火焰锋面, 最后选择用 2 作为临界 Da 数.

此外, Yoo 等^[17,31]提出可以使用进度变量 $Y_C \equiv Y_{CO_2+CO}$ 以确定火焰锋面的位置, 并发展了基于进度变量的 Da 数, 先后分析了 HCCI 燃烧模式下正庚烷(对应的临界 Da 数为 4)和异辛烷(对应的临界 Da 数为 2.5)的着火特性. 之后, Luong 等^[32]采用该判定方法研究 PRF 燃料在 HCCI 燃烧模式下的着火特性, 选取 3.3 作为临界 Da 数.

Budget term 和 Da 数判定方法的目的都是判断反应锋面上是火焰传播还是自燃着火, 根据燃料的不同可选取不同的关键组分. Da 数判定从自燃着火与

火焰传播的本质出发(比较扩散项和反应项的相对大小),是目前数值模拟判定中通用可靠的判别准则,但是对于二维湍流情况,考虑到湍流-燃烧相互作用,组分的选取有一定的困难.此外, Da 临界值会根据工况如初始平均温度、压力和当量比而变化,如表 2 所示,临界 Da 数会随燃料、燃烧模式等的不同而改变,缺乏统一的标准.

表 2 不同燃料和燃烧模式下的 Da 数判定对比

Tab.2 Comparison of Da number under different fuels and combustion modes

| 燃料 | 燃烧模式 | 关键物质 | 临界 Da 数 | 参考文献 |
|-------|-----------|--------------------------|-----------|------|
| 正庚烷 | HCCI | $Y_c \equiv Y_{CO_2+CO}$ | 4 | [17] |
| 异辛烷 | SACI/HCCI | $Y_c \equiv Y_{CO_2+CO}$ | 2.5 | [31] |
| PRF | HCCI | $Y_c \equiv Y_{CO_2+CO}$ | 3.3 | [32] |
| 正庚烷 | HCCI/SCCI | $Y_c \equiv Y_{CO_2+CO}$ | 2 | [33] |
| 生物柴油 | HCCI | — | 5.8 | [34] |
| PRF | RCCI/SCCI | $Y_c \equiv Y_{CO_2+CO}$ | 4.5 | [35] |
| H_2 | HCCI | HO_2 | 0.4 和 1.4 | [28] |
| DME | HCCI | H, OH, HO_2 | 2 | [30] |

1.3 基于 CEMA 的判定方法

2009 年 Lu 等^[36]提出了化学爆炸模式分析 CEMA 法,成功避免了目标标量和阈值的任意选择,为湍流火焰中不同燃烧模式的识别提供了一种稳健的诊断方法.

该方法建立在 CSP(计算奇异摄动)算法与时间尺度分析的理论基础之上,用于诊断复杂燃烧过程中的火焰结构.与 CSP 相比,CEMA 忽略了反应过程的多尺度特征,将重点放在化学爆炸模式上,而不考虑与其他模式的相互关系.同时遵循 CSP 中已经开发的理论基础和算法工具,对指标公式进行适当修正,形成 CEMA 的判定方法. CEMA 的主要思路是分析反应流控制方程中局部化学反应源项雅可比矩阵的特征值.离散化后的反应流控制方程可以表示为:

$$\frac{Dy}{Dt} = \omega(y) + s(y) \quad (7)$$

对化学源项进行求导得到:

$$\begin{cases} \frac{D\omega(y)}{Dt} = J_\omega \frac{Dy}{Dt} = J_\omega (\omega + s) \\ J_\omega = \frac{\partial \omega}{\partial y} \end{cases} \quad (8)$$

式中: D/Dt 为物质导数; y 是所有组分的质量分数和温度组成的向量; ω 为化学源项; s 为所有的非化学源项(如扩散项); J_ω 就是所谓的化学反应源项的雅可比矩阵.化学爆炸模式是与正特征值相关联的化学模式,即 $Re(\lambda_c) > 0$.若存在 $\lambda_{exp} > 0$,则表明存在

CEM,即存在爆炸性混合物,这通常会导致在空间均匀和无损环境中发生自燃.

$$\lambda_c = b_c \cdot J_\omega a_c \quad (9)$$

特征值 λ_c 和化学雅可比矩阵 J_ω 的关系见式(9), a_c 和 b_c 分别是与 CEM 关联的右、左特征向量. $1/\lambda_c$ 代表反应速率的时间尺度, $\lambda_c = 0$ 表示火焰锋面,然后沿该等值面垂线方向进行 Da_c 数分析.

此处的 Da_c 数定义为化学爆炸模式的时间尺度与标量耗散率之比:

$$\begin{cases} Da_c = \lambda_{exp} \cdot \chi^{-1} \\ \chi = 2D|\nabla c|^2 \\ c = \frac{Y_c}{Y_c^{eq}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: χ 是混合标量耗散率; c 为进度变量; D 为局部混合物的热扩散率; Y_c^{eq} 是 Y_c 的相应平衡值.当 $Da_c \gg 1$ 时,化学爆炸比混合快得多,因此,混合物以自燃为主.火焰前锋定义为 $Da_c = 1$ 位置,在该位置通过混合来平衡化学爆炸.研究表明, Da_c 数所描绘的火焰锋面位置与特征值基本是一致.但由于燃料和氧化剂需要预混才具有爆炸性,所以 Da_c 数只能检测预混或部分预混的火焰.

基于 CEMA 方法,广大学者不断探索新的参数以识别火焰传播模式. Xu 等^[37]提出,将局部化学源项和扩散项投影到化学爆炸模式(CEM),具体方式为将方程(11)投射到 CEM,即

$$b_c \cdot \frac{D\omega(y)}{Dt} = b_c \cdot J_\omega (\omega + s) = \lambda_c b_c \cdot (\omega + s) \quad (11)$$

$$\frac{D\phi_\omega}{Dt} = \lambda_c \phi_\omega = \lambda_c \phi_\omega + \lambda_c \phi_s + \frac{Db_c}{Dt} \cdot \omega(y) \quad (12)$$

投影化学源项(ϕ_ω)和扩散项(ϕ_s)定义为

$$\begin{cases} \phi_\omega \equiv b_c \cdot \omega \\ \phi_s \equiv b_c \cdot s \end{cases} \quad (13)$$

将扩散项与化学源项之比定为局部燃烧模式指标 α ,表示化学和扩散在点火过程中的相对重要性,结合 λ_c 和 α 即可以完成燃烧模式分区,对于具有化学活性的混合物(即 $\lambda_c > 1$): ① $\alpha > 1$: 辅助点火模式,扩散在燃烧过程中占主导,且促进化学反应; ② $|\alpha| < 1$: 自燃着火模式,化学反应在点火中起主导作用; ③ $\alpha < -1$: 局部熄灭模式,扩散主导化学反应但是抑制着火反应.

$0 < \lambda_c < 1$ 对应的是具有比较微弱的化学爆炸特性的新鲜混合气, $\lambda_c < 0$ 则表示不再具有化学爆炸特性的混合气体.

1.4 其他方法

除了上述提到的发展成熟、应用广泛的方法外,

还有其他大量学者在不断尝试提出创新性的准则. Schulz 等^[38]在研究甲烷/空气射流火焰时发现, 自燃着火工况下, 反应 (R8) ($\text{HO}_2 + \text{OH} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$) 是消耗 HO_2 的主要反应; 而在火焰传播工况下, 反应 (R6) ($\text{HO}_2 + \text{H} \rightleftharpoons \text{OH} + \text{OH}$) 是消耗 HO_2 的主要反应. 基于此, 提出一个基于反应速率的判别准则:

$$I_{\text{AI}} = \left| \frac{\dot{\omega}_{\text{HO}_2}^{(\text{R8})}}{\dot{\omega}_{\text{HO}_2}^{(\text{R8})} + \dot{\omega}_{\text{HO}_2}^{(\text{R6})}} \right| \quad (14)$$

$I_{\text{AI}} > 0.5$ 则为自燃着火, 反之则为火焰传播.

Fukushima 等^[39]创新性地地在 HCCI 和 PCCI 发动机中用拉格朗日流体粒子追踪的方法, 提出基于净热传导量的判别准则. 该方法通过对局部混合物的最大和最小热传导设置适当的阈值, 来讨论 3 种燃烧状态对整体燃料消耗的贡献. ① $|q_{p,\text{min}}| > q$, 且 $|q_{p,\text{max}}| > q$, 为火焰传播; ② $|q_{p,\text{max}}| < q$, 自燃着火; ③ $|q_{p,\text{min}}| < q$ 火焰包围.

应该注意的是, 阈值取决于燃料, 应根据燃料的化学性质确定.

此外, 不同学者基于自燃着火与火焰传播的本质特征, 提出了多种变形. Shan 等^[40]将局部对流项和扩散项的特征长度之比定义为 Nu_e 数, 若 $Nu_e \gg 1$, 则是自燃着火; 如果 $Nu_e \ll 1$, 判定为火焰传播. 对流项会影响火焰滞留时间, 因此当 $Nu_e \gg 1$ 时, 表明火焰滞留时间长, 说明是自燃着火占优; 当 $Nu_e \ll 1$ 时, 扩散项是主导因素, 因此认为是火焰传播. Martz 等^[25]提出, 可以根据火焰与化学时间尺度的比率 $\tau_{\text{Flame}} / \tau_{\text{Chem}}$ 确定反应前沿的燃烧状态. 当 $\tau_{\text{Flame}} / \tau_{\text{Chem}} \rightarrow 0$ 时, 为火焰传播模式; 当 $\tau_{\text{Flame}} / \tau_{\text{Chem}} \approx 1$ 时, 传输效应不显著, 反应物的燃烧完全依赖于化学反应时间尺度, 为自燃着火.

2 实验判定

通常在光学发动机、快速压缩机上进行实验, 并结合光学诊断研究使燃烧过程可视化, 如通过自发光高速成像技术来研究火焰发展情况、通过燃油-示踪剂 PLIF 定量测量缸内燃油浓度和活性分层. 但是通过实验只能得到包括如层流火焰速度、温度梯度等传统燃烧学的基本物理量, 限制了人们对燃烧现象的理解和对燃烧技术的创新.

Hultqvist 等^[3]在一台光学发动机上研究单循环中 HCCI 的燃烧过程, 用 PLIF 来观察发动机缸内燃烧图像, 将分析测量的缸内浓度分布及浓度梯度分布与已知案例 SI 发动机进行比较. 发现 HCCI 发动机缸

内已燃气体和未燃气体之间没有明显的界限, 而对于 SI 发动机, 燃烧区和未燃烧区之间存在明显的边界. 通过两个连续图像之间面积的变化可以计算传统燃烧学的基本物理量——火焰速度 $v = (dA/dt)/L$, L 为火焰前锋的长度. 根据火焰前锋面的周长选取不同的计算方法, 分为 3 种: 虚拟火焰前锋法、等效半径法和有效前锋法. 下面对这 3 种方法进行简单介绍.

虚拟火焰前锋法基于火焰自发光图像或者 PLIF 图像, 假设一个包含所有自燃着火点的虚拟火焰前锋 (如图 3 中红色虚线所示), 用该虚拟火焰前锋的速度表示为火焰速度. 等效半径法计算火焰速度的基本原理则是将火焰的投影面积等效成面积相同的圆, 除此之外, 有学者考虑到火焰的非各向同性传播, 将其拟合合成椭圆进行计算, 精度得到提高但有限. 而在压燃式发动机中存在燃油浓度分层以及火焰撞壁现象, 火焰投影形状可能不是近似圆形, 因而等效半径法便不再适用^[41]. 此时, 可以使用有效前锋法来计算自燃着火点的火焰速度, L 为真实火焰前锋的长度, 确定较为复杂, 故不适合处理大量实验数据. 所以, 大部分学者通过等效半径法来计算实验条件下的火焰速度, 如唐青龙^[42]提取了 PPC-25 早期燃烧火焰发展边界, 发现 PPC 模式存在明显火焰传播过程 (见图 4). 并采用等效半径计算方法, 对 A、B 和 C 3 个着火点的火焰速度进行了计算 (见图 5), 计算发现 3 个着火点的火焰速度范围在 10 ~ 60 m/s 之间, 故可以看做是介于 SI 和 HCCI 的中间过程, PPC 燃烧过程中自燃着火和火焰传播共存.

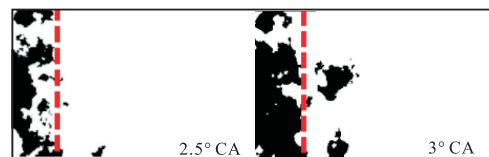


图 3 计算 HCCI 火焰传播速度时的虚拟火焰前锋^[3]
Fig.3 The virtual flame front when calculating the HCCI flame propagation velocity^[3]

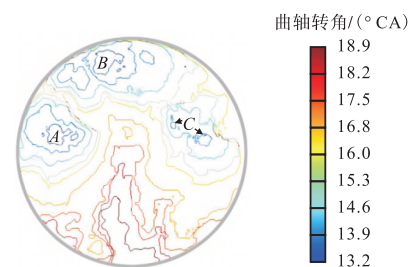


图 4 PPC-25 燃烧火焰发展过程^[42]
Fig.4 Flame development process for PPC-25 case^[42]

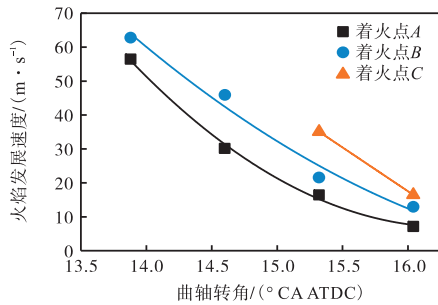


图5 燃烧初期火焰边界发展速度

Fig.5 Flame speed of the initial flame front propagation.

3 总结与展望

通过探究不同燃料在温度、浓度、活性分层下的点火特性,得到自燃和火焰传播的特性,并根据特性提出多种判别自燃着火与火焰传播的方法.在众多数值模拟方法中, Da 数从自燃着火与火焰传播的本质切入,是现如今最可靠、最权威的方法;CEMA作为一种新兴的方法,可用于诊断复杂燃烧过程中的火焰结构,且随着计算机资源的发展,其发挥的作用越来越大,逐渐得到大家的认可.但无论是 Da 数判定还是CEMA判定,都需要强大的计算资源作为支撑,且受限于实验参数,无法在相关实验上进行验证.相比 Da 数和CEMA,速度判定的公式更为宏观,对计算机性能的要求相对较低,部分实验参数通过光学诊断可以得到,但是预测精度受限.如Strozzi等^[26]早在2012年就用该方法来预测快压机上的点火模式,结果发现对前中期的燃烧过程表现出较好的一致性,但是无法对后期的燃烧行为进行预测,作者指出需要进一步的工作来评估并最终改进对类似条件下燃烧后期阶段的预测.相比之下,在实验方面的判定方法略显单一,多通过光学诊断的方法来实现.首先根据火焰自发光图像来初步判定点火模式,再结合“等效半径法”来计算火焰锋面的速度,并将其与SI和HCCI中的火焰发展速度进行比较,根据相对大小进行判定.但该方法存在以下3点问题:①光学诊断所呈现的图像是二维平面,而实际燃烧区域为三维空间,具体点火位置无法确定;②根据火焰自发光图像进行判定带有作者较强的主观性,即无法定量判断点火模式;③仅通过实验可获取的信息有限,无法对点火模式的比例及各自对放热率的贡献等详细信息进行精确判定.

在自燃着火和火焰传播的判定方面,目前的关键问题是所提出的用于数值模拟的判定准则尚未在实验上进行过验证,各准则是否和实验结果会有良好的

一致性,即定量和定性的结果是否可以一一对应,亟需进行验证.若仅基于传统的燃烧理论,点火模式的识别判定很难有新的突破.随着机器学习和图像处理技术的发展为该的研究带来了新的局面.如果将人工智能和图像处理技术应用于燃烧诊断领域,并对不同判定准则修正拓展,则有望实现点火模式的定量与定性双重识别,明晰自燃着火和火焰传播的作用机制,为新型燃烧模式下燃烧过程的调控提供理论依据.

参考文献:

- [1] European Automobile Manufacturers' Association. The Automobile industry Pocket Guide 2022/2023[EB/OL]. <https://www.acea. auto/publication/automobile-industry-pocket-guide-2022-2023>, 2022-09-06.
- [2] Onishi S, Souk H, Katsuji S, et al. Active thermo-atmosphere combustion(ATAC): A new combustion process for internal combustion engines[C]//SAE Technical Papers. Detroit, Michigan, USA, 1979, 790501.
- [3] Hultqvist A, Christensen M, Johansson B, et al. The HCCI combustion process in a single cycle - speed fuel tracer lif and chemiluminescence imaging[C]//SAE Technical Papers. Detroit, Michigan, USA, 2002, 2002-01-0424.
- [4] Johansson B. Cycle to cycle variations in SI engines-the effects of fluid flow and gas composition in the vicinity of the spark plug on early combustion[C]//SAE Technical Papers. Detroit, Michigan, USA, 1996, 962084.
- [5] Drake M C, Haworth D C. Advanced gasoline engine development using optical diagnostics and numerical modeling[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 99-124.
- [6] Zheng Zunqing, Fang Xinghui, Liu Haifeng, et al. Study on the flame development patterns and flame speeds from homogeneous charge to stratified charge by fueling n-heptane in an optical engine[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 199: 213-229.
- [7] Brands T, Hottenbach P, Koss H J, et al. Effects of mixture stratification on ignition and combustion in a GCAI engine[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2014, 7(2): 714-729.
- [8] Tang Qinglong, Liu Haifeng, Ran Xingwang, et al. Effects of direct-injection fuel types and proportion on late-injection reactivity controlled compression ignition [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 211: 445-455.
- [9] 刘海峰, 文铭升, 杨智, 等. 发动机缸内自燃着火与火焰传播的调控[J]. *内燃机学报*, 2020, 38(3):

- 200-209.
- Liu Haifeng, Wen Mingsheng, Yang Zhi, et al. Optical diagnostics on combustion mode between auto-ignition and flame propagation in engines[J]. *Transactions of CSICE*, 2020, 38(3): 200-209(in Chinese).
- [10] Gu X J, Emerson D R, Bradley D. Modes of reaction front propagation from hot spots[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133(1/2): 63-74.
- [11] Lu T F, Yoo C S, Chen J H. The role of chemical explosive mode in flames[C]//2009 Fall Technical Meeting. Maryland, USA, 2009.
- [12] Zeldovich Y. Regime classification of an exothermic reaction with nonuniform initial conditions[J]. *Combustion and Flame*, 1980, 39(2): 211-214.
- [13] Chen J H, Hawkes E R, Sankaran R, et al. Direct numerical simulation of ignition front propagation in a constant volume with temperature inhomogeneities[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 145(1/2): 128-144.
- [14] Luong M B, Yu G H, Chung S H, et al. Ignition of a lean prf/air mixture under RCCI/SCCI conditions: A comparative dns study[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 3623-3631.
- [15] El-Asrag H A, Ju Yiguang. Direct numerical simulations of NO_x effect on multistage autoignition of dme/air mixture in the negative temperature coefficient regime for stratified HCCI engine conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(1): 256-269.
- [16] Persson H, Hultqvist A, Johansson B, et al. Investigation of the early flame development in spark assisted HCCI combustion using high speed chemiluminescence imaging[C]//SAE Technical Papers. Detroit, Michigan, USA, 2007, 2007-01-0212.
- [17] Yoo C S, Lu T, Chen J H, et al. Direct numerical simulations of ignition of a lean n-heptane/air mixture with temperature inhomogeneities at constant volume: Parametric study[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(9): 1727-1741.
- [18] Sankaran R, Im H G, Hawkes E R, et al. The effects of non-uniform temperature distribution on the ignition of a lean homogeneous hydrogen-air mixture[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 875-882.
- [19] Im H G, Pal P, Wooldridge M S, et al. A regime diagram for autoignition of homogeneous reactant mixtures with turbulent velocity and temperature fluctuations[J]. *Combustion Science and Technology*, 2015, 187(8): 1263-1275.
- [20] Luong M B, Hernandez Perez F E, Sow A, et al. Quantitative prediction of combustion modes, combustion intensity, and ignition delay times[C]//AIAA Scitech 2019 Forum. San Diego, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [21] Karimkashi S, Kahila H, Kaario O, et al. A numerical study on combustion mode characterization for locally stratified dual-fuel mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 214: 121-135.
- [22] Walton S, He X, Zigler B, et al. An experimental investigation of iso-octane ignition phenomena[J]. *Combustion and Flame*, 2007, 150(3): 246-262.
- [23] Mansfield A B, Wooldridge M S, Di H, et al. Low-temperature ignition behavior of iso-octane[J]. *Fuel*, 2015, 139: 79-86.
- [24] Mansfield A B, Wooldridge M S. High-pressure low-temperature ignition behavior of syngas mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(9): 2242-2251.
- [25] Martz J B, Kwak H, Im H G, et al. Combustion regime of a reacting front propagating into an auto-igniting mixture[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 3001-3006.
- [26] Strozzi C, Mura A, Sotton J, et al. Experimental analysis of propagation regimes during the autoignition of a fully premixed methane-air mixture in the presence of temperature inhomogeneities[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(11): 3323-3341.
- [27] 张 帆, 尧命发. 三维直接数值模拟部分预混发动机内的燃烧过程[J]. *物理化学学报*, 2016, 32(8): 1941-1949.
- Zhang Fan, Yao Mingfa. Three-dimensional direct numerical simulation of partially premixed combustion in engine-related conditions[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2016, 32(8): 1941-1949(in Chinese).
- [28] Bansal G, Im H G. Autoignition and front propagation in low temperature combustion engine environments[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(11): 2105-2112.
- [29] 章 严. 基于 FGM 的燃烧模型开发及在部分预混压燃中的应用[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2021.
- Zhang Yan. Combustion Model Development Based on Flamelet Generated Manifolds and Application on Partially Premixed Combustion[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2021(in Chinese).
- [30] Su Litian, Zhang Meng, Wang Jinhua, et al. Direct

- numerical simulation of dme auto-ignition with temperature and composition stratification under hcci engine conditions[J]. *Fuel*, 2021, 285: 119073.
- [31] Yoo C S, Luo Z, Lu T, et al. A dns study of ignition characteristics of a lean iso-octane/air mixture under hcci and saci conditions[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2985-2993.
- [32] Luong M B, Luo Z, Lu T, et al. Direct numerical simulations of the ignition of lean primary reference fuel/air mixtures with temperature inhomogeneities[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(10): 2038-2047.
- [33] Luong M B, Yu G H, Lu T, et al. Direct numerical simulations of ignition of a lean n-heptane/air mixture with temperature and composition inhomogeneities relevant to HCCI and SCCI combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(12): 4566-4585.
- [34] Luong M B, Lu T, Chung S H, et al. Direct numerical simulations of the ignition of a lean biodiesel/air mixture with temperature and composition inhomogeneities at high pressure and intermediate temperature[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(11): 2878-2889.
- [35] Luong M B, Sankaran R, Yu G H, et al. On the effect of injection timing on the ignition of lean prf/air/egr mixtures under direct dual fuel stratification conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 183: 309-321.
- [36] Lu T F, Yoo C S, Chen J H, et al. Three-dimensional direct numerical simulation of a turbulent lifted hydrogen jet flame in heated coflow: A chemical explosive mode analysis[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 652: 45-64.
- [37] Xu C, Park J-W, Yoo C S, et al. Identification of premixed flame propagation modes using chemical explosive mode analysis[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(2): 2407-2415.
- [38] Schulz O, Jaravel T, Poinot T, et al. A criterion to distinguish autoignition and propagation applied to a lifted methane-air jet flame[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 1637-1644.
- [39] Fukushima N, Katayama M, Naka Y, et al. Combustion regime classification of HCCI/PCCI combustion using lagrangian fluid particle tracking[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3009-3017.
- [40] Shan R, Yoo C S, Chen J H, et al. Computational diagnostics for n-heptane flames with chemical explosive mode analysis[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(10): 3119-3127.
- [41] 房性会. 内燃机部分预混燃烧火焰发展特性的可视化研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2018.
Fang Xinghui. Optical Study on the Flame Development Characteristics of Partially Premixed Combustion in IC Engine[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2018 (in Chinese).
- [42] 唐青龙. 内燃机新型燃烧模式燃烧机理光学诊断[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2017.
Tang Qinglong. Optical Diagnostics on the Mechanism of the New Combustion Modes of IC Engine[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2017 (in Chinese).