DOI: 10.19666/j.rlfd.202605048

预混火焰稳定性机理与表征方法研究进展

刘佳艺[1]，王子豫[1]，林 瑜[2]，沈 婷[2]，朱 彤[1]，季晨振[1]
（1. 同济大学汽车与能源学院，上海 201804；
2. 美的集团股份有限公司，广东 佛山 528311）

［摘 要］【目的】预混火焰稳定性是燃气轮机、航空发动机、工业燃烧装置及分布式能源系统实现高效、低排放与安全运行的关键问题。随着贫燃预混、掺氢燃烧、强旋流燃烧及紧凑燃烧结构的发展，火焰对局部拉伸、差异扩散、壁面热损失和流动非均匀性的敏感性增强，传统以极限当量比或极限流速表征稳定边界的方法已难以揭示火焰失稳机制。【进展】围绕预混火焰稳定性机理与表征方法，本文系统梳理速度匹配、达姆科勒数、火焰拉伸与曲率、马克斯坦响应、刘易斯数、卡尔洛维茨数及热边界耦合等理论基础，归纳粒子图像测速、平面激光诱导荧光、高速化学发光及多模态同步诊断在关键区域识别和近极限动态路径表征中的应用，并评述直接数值模拟、大涡模拟与共轭传热模拟在局部熄灭、再燃、流动组织、热边界反馈及工程稳焰预测中的作用与局限。研究表明，整体吹熄、回火和稳焰模式转换通常并非全火焰面同步失稳，而是火焰根部、剪切层、回流区边界和近壁区域局部反应减弱、火焰脱体、上游传播及再燃失败等事件累积发展的结果。【结论】预混火焰稳定性本质上取决于局部反应维持能力与流动拉伸、混合耗散、停留时间及热损失之间的竞争关系。未来应建立局部失稳特征量与整体稳定边界之间的跨尺度映射，为复杂燃烧器中预混火焰稳定性的预测、表征与调控提供理论支撑。

［关 键 词］预混火焰；火焰稳定性；局部失稳；实验诊断；数值模拟

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码.

Research progress on stability mechanisms and characterization methods of premixed flames

Liu Jiayi[1], Wang Ziyu[1], Lin Yu[2], Shen Ting[2], Zhu Tong[1], Ji Chenzhen[1]
(1. College of Auto & Energy, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Midea Group Co., Ltd., Foshan 528311, China)

Abstract: [Objective] Premixed flame stability is essential for the efficient, low-emission, and safe operation of gas turbines, aero-engines, industrial combustors, and distributed energy systems. With the increasing use of lean premixed combustion, hydrogen-enriched fuels, strong swirl stabilization, compact combustor designs, and thermal-boundary coupling, premixed flames have become more sensitive to local stretch, differential diffusion, wall heat loss, flow non-uniformity, and unsteady coherent structures. Conventional stability indicators, such as the limiting equivalence ratio and the critical flow velocity, can describe the global operating boundary of a combustor. However, they cannot adequately explain where instability is initiated, which local mechanism dominates, or how local flame weakening develops into blow-off, flashback, or stabilization-mode transition. Therefore, premixed flame stability should be analyzed by linking global stability limits with local flame response and combustor-scale flow-thermal coupling. [Progress] This paper reviews the mechanisms and characterization methods of premixed flame stability. The theoretical basis is summarized from the perspectives of velocity matching, the Damköhler number, flame stretch, flame curvature, Markstein response, Lewis-number effects, Karlovitz-number-based turbulent combustion regimes, and thermal-boundary coupling. These concepts show that

收 稿 日 期：2026-05-15 修 回 日 期：2026-06-15 接 受 日 期：2026-06-17 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（51976140）
Supported by: National Natural Science Foundation of China (51976140)
第一作者简介：刘佳艺（2002），女，硕士研究生，主要研究方向为高效清洁稳定燃烧技术，liujiayi02623@tongji.edu.cn。
通信作者简介：林瑜（1979），男，博士，高级工程师，主要研究方向为厨热关键技术研发，linyu19@midea.com。

flame stability is not governed by a single parameter. Instead, it depends on the balance among local flame propagation, residence time, strain rate, curvature, scalar dissipation, differential diffusion, and heat exchange. Turbulent premixed combustion regime diagrams provide a useful scale background for evaluating turbulence-flame interaction. However, global regime parameters should not be directly used as local extinction or flashback criteria, especially in flame roots, shear layers, recirculation-zone boundaries, and near-wall regions. Experimental methods are also reviewed, including particle image velocimetry, planar laser-induced fluorescence, high-speed chemiluminescence imaging, pressure measurement, wall-temperature measurement, and multimodal synchronized diagnostics. These methods help identify flame-root motion, recirculation-zone dynamics, local intermittency, heat-release oscillations, and near-limit transition pathways. Existing studies indicate that lean blow-off, flashback, and stabilization-mode transition usually do not result from simultaneous failure over the whole flame surface. They are more often caused by the accumulation of local events, including reaction weakening, flame-root detachment, local extinction, downstream residual reaction, hot-product recirculation, intermittent re-ignition, and final re-ignition failure. The roles of direct numerical simulation, large eddy simulation, and conjugate heat transfer simulation are further discussed. Direct numerical simulation is suitable for resolving detailed chemistry, molecular transport, scalar dissipation, local extinction, re-ignition, and radical transport in canonical flames. Large eddy simulation is useful for predicting coherent structures, flame-root dynamics, heat-release oscillations, and near-blow-off behavior in practical combustors. Its reliability depends on subgrid combustion models, inlet turbulence, grid resolution, chemical mechanisms, and wall-boundary treatment. Conjugate heat transfer simulation extends stability analysis to solid conduction, wall heat flux, stabilizer temperature, and thermal feedback. It is important for compact combustors and near-wall flame stabilization. [Conclusion] Premixed flame stability is controlled by the competition between local reaction-sustaining capability and flow-induced stretch, mixing dissipation, residence time, differential diffusion, and heat loss. Global stability boundaries should be understood as the macroscopic outcome of local flame response and combustor-scale flow-thermal coupling. Future studies should establish cross-scale relationships between local instability indicators and global stability limits. Experimental validation using multimodal diagnostics should be strengthened. Numerical modeling frameworks based on direct numerical simulation, large eddy simulation, and conjugate heat transfer simulation should also be further improved. These efforts will support the prediction, characterization, and control of premixed flame stability in complex low-emission combustors.

Key words: premixed flame; flame stability; local instability; experimental diagnostics; numerical simulation

随着燃气轮机、航空发动机、工业燃烧装置和分布式能源系统向高效率、低排放和宽负荷的运行方向发展，贫燃预混燃烧因能够降低局部火焰峰值温度和污染物生成而受到广泛关注。然而，在强旋流、紧凑结构、掺氢燃料和复杂热边界条件下，预混火焰更易发生吹熄、回火和稳焰模式转换等稳定性问题[1-6]。

实际预混火焰稳定性已难以仅用极限当量比和极限流速等宏观参数来表征，而更受火焰根部附近流动组织、热边界条件及局部输运过程共同控制。旋流器结构、喷注系统阻抗以及燃烧与声学耦合会显著影响系统火焰响应与不稳定性特征；在小尺度或近壁燃烧结构中，壁面热传导还会进一步改变火焰稳定位置和吹熄边界[1,3-6]。

作为稳定边界的宏观表征量，极限当量比和极限流速能够界定特定几何形状、燃料成分和边界条件下的燃烧器稳定运行范围，但难以进一步揭示失稳起始位置、主导局部机制及其向整体吹熄或回火发展的动态过程。在现代贫燃预混燃烧器中，强旋流回流、掺氢差异扩散、非均匀热边界和燃烧不稳定耦合往往同时存在。即使全局当量比或入口速度相同，火焰根部锚定状态、局部拉伸率和再燃能力仍可能存在显著差异。因此，仅依赖传统极限参数难以区分速度失配、停留时间不足、局部拉伸熄灭、近壁热损失及热声耦合等不同失稳路径，也难以为燃烧器结构优化、燃料适配和主动稳定控制提供直接的机理性依据。

近年针对掺氢燃料及热质扩散不平衡显著的预混火焰研究表明，差异扩散与热扩散不稳定性会增大火焰对压力、温度、当量比及湍流扰动的敏感程度，并显著影响火焰结构、传播速度和局部温度分布。若在大涡模拟中忽略上述效应及其亚格子尺度闭合作用，火焰长度和局部温度分布的预测精度将明显下降[7-10]。

基于此，吹熄、回火及稳焰模式转换更应理解为局部失稳事件在时间和空间上的累积结果，而非单一稳态边界的简单外推。本文围绕预混火焰稳定性机理与表征方法，系统梳理速度匹配、时间尺度判据、火焰拉伸响应、实验诊断和数值模拟等方面的研究进展，为复杂燃烧器中预混火焰稳定性的预

测与分析提供参考。

1 预混火焰稳定性的理论基础：从整体稳焰判据到局部失稳机理

预混火焰稳定性的理论分析涉及整体尺度、火焰面局部尺度和燃烧器尺度 3 个层面。早期研究主要依据速度匹配关系和达姆科勒数（Damköhler number，*Da*）分析火焰驻定与整体吹熄边界；随后，火焰拉伸、火焰面曲率、Markstein 响应、刘易斯数（Lewis number，*Le*）和卡尔洛维茨数（Karlovitz number，*Ka*）被用于解释局部传播能力变化和局部熄灭机理；在实际燃烧器中，回流区、剪切层、相干结构和热边界条件又进一步调制火焰根部的稳定状态。基于上述研究脉络，本节对预混火焰稳定性的理论基础作分类讨论。

1.1 速度匹配与时间尺度判据

早期预混火焰稳定性研究主要从火焰传播速度与来流速度之间的平衡关系出发。Wohl 等人[11]关于开口火焰稳定性的研究表明，火焰前缘可驻定于局部法向来流速度与层流燃烧速度相匹配的位置，基本稳焰条件为：

$$u_n = S_{\mathrm{L}} \tag{1}$$

式中：u_n 为未燃混合气相对于火焰面的局部法向速度，m/s；S_{L} 为层流燃烧速度，m/s；下标 n 表示火焰面法向方向。本文法向速度均指相对于火焰面的未燃气侧法向速度。当二者在局部达到平衡时，火焰前缘可在平均意义上保持驻定；若 $u_n>S_{\mathrm{L}}$，火焰更易被来流带离稳定位置；若 $u_n<S_{\mathrm{L}}$，火焰则可能向上游传播。

速度匹配关系给出了火焰驻定的必要条件，但该关系建立在局部流场与火焰传播过程可由平均量描述的前提下。当流场中存在强湍动、回流结构或非均匀热边界时，单纯速度平衡难以解释火焰为何优先在根部、剪切层或近壁区域发生局部减弱。

为进一步描述流动输运与化学反应之间的竞争关系，Damköhler 提出了基于时间尺度比的达姆科勒数：

$$Da = \frac{\tau_{\mathrm{res}}}{\tau_{\mathrm{chem}}} \tag{2}$$

式中：*Da* 为达姆科勒数，无量纲；τ_{res} 为流动特征时间尺度，s，通常用于表征流体微团在回流区或特征控制体内的停留时间；τ_{chem} 为化学反应特征时间尺度，s，表征完成主要放热反应所需的典型时间。当 *Da* 较大时，流体微团在离开反应区前通常有足够时间完成主要反应，火焰更易维持；当 *Da* 降低时，流动输运对反应过程的削弱作用增强，整体吹熄的可能性随之增大。

Longwell 和 Weiss[12]将钝体尾流区类比为完全搅拌反应器后，进一步将这一时间尺度判据引入整体吹熄边界分析。由此，火焰能否维持不再仅由速度匹配决定，而与停留时间和化学反应时间之间的相对关系密切相关。

从整体尺度看，速度匹配关系和 *Da* 为稳焰条件及吹熄边界分析提供了基础框架。然而，对于近吹熄条件下火焰为何优先在火焰根部、剪切层或近壁区域发生局部减弱，这些整体判据仍难以给出充分解释。相应地，后续研究逐步转向火焰面局部输运、局部传播速度响应以及局部熄灭起始机制的分析。

1.2 火焰拉伸、曲率与差异扩散效应

随着火焰面理论和局部火焰结构研究的发展，预混火焰稳定性分析逐步由整体尺度转向火焰面局部过程。Karlovitz 等人[13]将火焰面积变化率定义为火焰拉伸率 K：

$$K = \frac{1}{A}\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中：K 为火焰拉伸率，s^{-1}；A 为火焰面面积，m^2；t 为时间，s。该定义描述火焰面单位时间内的相对面积变化。当 $K>0$ 时对应正拉伸，火焰面积增加；当 $K<0$ 时对应负拉伸，火焰面积减小。

Markstein[14]进一步指出，火焰对拉伸并非被动响应，局部传播速度会随拉伸作用发生变化。常用的一阶关系为：

$$S_{\mathrm{d}} \approx S_{\mathrm{L}} - L_{\mathrm{M}}K \tag{4}$$

式中：S_{d} 为局部法向位移速度，m/s；L_{M} 为 Markstein 长度，m。

式(4)属于弱拉伸、小曲率或准层流火焰片假设下的一阶近似，主要用于说明局部传播速度对火焰拉伸的线性响应。在高湍流强度、高 *Ka*、复杂三维火焰面或显著热声耦合条件下，L_{M}、K、火焰面法向及 S_{d} 的提取均存在不确定性，因此该关系更适合作为局部响应机理解释，而不宜单独作为工程燃烧器稳定边界判据。对于 $L_{\mathrm{M}}>0$ 的火焰，正拉伸通常降低局部传播能力；对于 $L_{\mathrm{M}}<0$ 的火焰，正拉伸可能增强局部传播速度。*Le* 偏离 1 时，热扩散与组分扩散的不匹配会改变这种响应关系[15-16]。因此，局

部失稳并不只取决于流动所施加的应变水平，还与火焰本身对拉伸的响应特性密切相关。

在更细的结构尺度上，火焰拉伸可进一步分解为曲率效应与流场非均匀性效应，Creta 和 Matalon[17]给出的总拉伸率表达式可写为：

$$K = a_t + S_d\kappa \tag{5}$$

式中：a_t 为切向应变率，s^{-1}，用于描述流场剪切与应变对火焰面的拉伸作用；S_d 为局部法向位移速度，m/s；κ 为火焰曲率，m^{-1}。曲率项符号与火焰面法向定义有关，指向未燃气侧的法向为正。该式表明，火焰面既可因自身几何形状产生曲率拉伸，也可因周围流场中的切向应变受到附加拉伸。

Echekki 和 Chen[18]的直接数值模拟结果进一步说明，非定常应变率与曲率变化会影响火焰面的局部扩散过程，并进一步改变热释放率和自由基分布。

在上述框架下，局部熄灭一般不表现为整个火焰前缘的同步变化，而通常与局部拉伸增强、曲率突变或热损失增大有关，相关现象多出现在火焰根部、剪切层邻近区域及近壁位置。

1.3 湍流预混燃烧区划及其与局部失稳判据的关系

在火焰拉伸理论基础上，预混火焰稳定性研究进一步扩展至湍流尺度。Peters[19-20]提出的 Borghi-Peters 湍流预混燃烧区划图以湍流强度、湍流积分尺度和层流火焰特征尺度之间的相对关系为基础，将湍流预混火焰划分为皱褶火焰片、薄反应区以及分布反应区等典型状态。该区划图的核心意义并不是直接给出吹熄或回火边界，而是通过比较湍流涡结构与火焰内在尺度之间的关系，判断湍流主要作用于火焰面形态与预热层，进一步影响反应区结构。

湍流预混燃烧区划图通常以湍流强度与层流燃烧速度之比 u'/S_L、湍流积分尺度与层流火焰厚度之比 l_t/δ_L 为基本坐标。其中：u'为湍流脉动速度，m/s；l_t 为湍流积分尺度，m；δ_L 为层流火焰厚度，m。u'/S_L 主要反映湍流速度脉动相对于火焰自身传播速度的强弱；l_t/δ_L 主要反映湍流大尺度涡结构相对于层流火焰厚度的大小。同时也可结合由此推导得到的湍流雷诺数 Re_t、Ka 和 Da 等无量纲数进行分析。其中，湍流雷诺数 Re_t 用于表征湍流积分尺度上惯性效应与黏性效应的相对强弱，通常可表示为：

$$Re_t = \frac{u' l_t}{\nu} \tag{6}$$

式中：Re_t 为湍流雷诺数，无量纲；；ν 为运动黏度，m^2/s；下标 t 表示湍流。Ka 是表征小尺度湍流扰动火焰内部结构的重要参数，通常可表示为：

$$Ka = \frac{\tau_{chem}}{\tau_\eta} \tag{7}$$

式中：Ka 为卡尔洛维茨数，无量纲；τ_{chem} 为化学反应特征时间尺度，s；τ_η 为 Kolmogorov 时间尺度，s，用于表征最小湍流尺度的时间特征；下标 η 表示 Kolmogorov 尺度。Ka 反映小尺度湍流对火焰预热层和反应区的扰动强度。当 Ka 较小时，火焰前缘仍可近似视为局部层流火焰片；随着 Ka 增大，小尺度湍流对预热层和反应区的扰动增强，局部熄灭与再燃的可能性随之提高[21-24]。

为进一步说明上述无量纲参数之间的尺度关系，图 1 给出了基于 Borghi-Peters[19-20]湍流预混燃烧区划思想绘制的预混火焰区划示意。图中横坐标为湍流积分尺度与层流火焰厚度之比 l_t/δ_L，纵坐标为湍流强度与层流燃烧速度之比 u'/S_L。若令 $x = l_t/\delta_L$、$y = u'/S_L$，并采用 $\tau_{chem} \approx \frac{\delta_L}{S_L}$、$\tau_t \approx \frac{l_t}{u'}$ 以及 $\nu \approx S_L\delta_L$ 的常用尺度估计，则可得到 $Da \approx \frac{x}{y}$、$Re_t \approx xy$、$Ka \approx y^{\frac{3}{2}}x^{-\frac{1}{2}}$。因此，在双对数坐标中，$Da=1$、$Ka=1$ 和 $Re_t=1$ 分别对应 $y=x$、$y=x^{\frac{1}{3}}$ 和 $y=x^{-1}$。其中，$Da=1$ 表示流动时间尺度与化学反应时间尺度相当，$Ka=1$ 表示小尺度湍流开始显著影响火焰预热层，$Re_t=1$ 则用于表征湍流雷诺数的参考边界。图中不同区划主要用于说明湍流尺度与火焰结构之间的相互作用关系，而不直接等同于局部吹熄或回火边界。

由图 1 可见，不同湍流预混燃烧区划对应的主导失稳机制存在差异。在皱褶火焰片区，湍流主要改变火焰面褶皱程度和火焰面积，反应层通常仍保持连续，火焰稳定性更多受火焰根部锚定、局部速度匹配、回流补热和整体停留时间控制；在薄反应区，小尺度湍流可进入预热层并增强局部拉伸、曲率变化和标量耗散，火焰根部、剪切层或回流区边界附近更易出现局部反应减弱；当火焰进入分布反应区或破碎反应区时，湍流对反应区本身的扰动进一步增强，局部熄灭、间歇再燃和火焰片破碎可能成为影响整体稳定边界的重要过程。因此，将速度匹配、Da、Ka 和局部拉伸指标与湍流预混燃烧区划相结合，有助于判断预混火焰失稳主要受整体停留时间不足、局部拉伸熄灭还是湍流扰动反应区结构所控制。

湍流预混燃烧区划图反映的是全局或代表性尺度下湍流尺度与火焰结构之间的关系，其作用在

于为主导燃烧状态判断提供尺度背景，而不能直接作为火焰根部、剪切层或近壁区域局部稳定性的判据。实际燃烧器中，火焰根部、剪切层、回流区边界和近壁区域的局部湍流强度、温度、当量比和热损失条件可能存在显著差异，使同一燃烧器内不同区域处于不同的局部燃烧区划状态。因此，高 *Ka* 条件并不必然意味着整个反应区完全破碎，低 *Ka* 条件下也可能因近壁热损失或局部速度失配发生局部失稳。已有数值研究表明，在高压和强湍流条件下，局部反应层仍可能保持一定空间连续性，其传播行为仍受曲率、应变和差异扩散共同影响[22-25]。Cho 等人[26]进一步指出，基于局部拉伸火焰参数构造的局部 *Ka* 与熄灭条件之间具有更直接的对应关系。因此，在工程燃烧器近吹熄稳定性分析中，*Ka* 及湍流预混燃烧区划更适合作为燃烧状态判断和尺度背景参数，而局部熄灭判定仍需结合火焰根部、剪切层及近壁区域的局部应变率、曲率、标量耗散率、热损失和局部反应强度等指标综合分析。

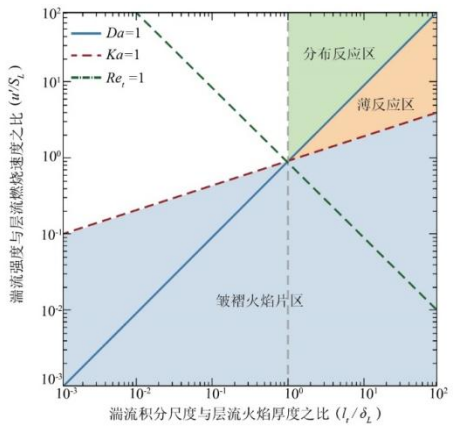


图 1 湍流预混燃烧区划与局部失稳判据关系示意
Fig.1 Schematic relationship between turbulent premixed combustion regimes and local instability criteria

1.4 实际燃烧器中的流动组织与热边界作用

当分析对象扩展至燃烧器尺度时，回流区、剪切层、大尺度相干结构以及热边界条件成为稳焰分析不可或缺的组成部分。Poinsot 等人[21]关于淬熄过程和湍流燃烧区划的讨论表明，热损失、*Le* 效应与外加应变并非彼此孤立，而是在具体流动组织中共同改变局部反应层的维持条件。

在旋流燃烧器中，中心回流区（central recirculation zone，CRZ）通过回卷高温产物并延长局部停留时间，影响火焰根部稳定状态[27-28]。同时，进动涡核（precessing vortex core，PVC）和剪切层涡结构会周期性改变火焰根部附近的混合路径和局部拉伸水平[29-30]。对于钝体稳定火焰，尾流再循环区和主剪切层则控制火焰根部附近的补热与掺混过程[31-32]。尽管不同燃烧器的流动组织形式不同，但均表明：当回流补热减弱、剪切层局部拉伸增强或壁面热损失增大时，优先失稳区域往往出现在火焰根部、回流区边界或近壁位置。

在工程燃烧室中，上述局部机制通常体现为旋流器、喷注系统、值班火焰、扩张段和冷却壁面等部件对火焰根部状态的联合调控。燃气轮机贫燃预混燃烧室常利用旋流诱导的 CRZ 回卷高温产物，以提高火焰根部的停留时间和再燃能力；但当旋流数、喷口扩张角或燃料分级比例改变时，CRZ 尺度、内外剪切层位置及 PVC 强度也会随之变化，进而引起 V 形、M 形、附着火焰和脱体火焰等不同稳焰模式转换。Stöhr 等人[30]针对燃气轮机旋流燃烧室模型的贫燃吹熄过程表明，整体吹熄前火焰并非同步消失，而是经历局部反应区间歇减弱、回流区内火焰片破碎和再燃失败等阶段。Taamallah 等人[33]进一步指出，预混旋流火焰的稳焰模式与局部 *Ka* 和火焰根部结构密切相关，表明工程燃烧室的稳定边界不能仅由全局当量比或入口速度予以充分解释。对于掺氢燃气轮机燃烧室，氢气提高层流燃烧速度并可能增强抗吹熄能力，但同时会改变热声响应、回火风险和差异扩散特征，使燃料适配与稳定控制面临更复杂的约束[2]。因此，实际燃烧室中的稳焰调控实质上是在扩大稳定运行范围、抑制热声振荡、避免回火和控制污染物排放之间进行多目标协调。

1.5 适用范围与局限

综上，预混火焰稳定性无法由单一判据完整描述。不同理论判据分别对应不同物理尺度和适用场景，其优势与局限也存在明显差异。速度匹配关系主要适用于层流火焰、弱湍流火焰或喷口附近火焰前缘的平均驻定分析，能够描述局部来流速度与火焰传播速度之间的基本平衡关系，但在强旋流、强回流、非定常剪切层以及近壁热损失显著的燃烧器中，仅速度平衡难以解释火焰根部脱体、局部熄灭和再燃失败等动态过程。*Da* 判据从停留时间与化学反应时间竞争的角度描述火焰能否维持，适用于钝体稳定火焰、回流区稳焰和旋流燃烧器整体吹熄趋势分析；但其结果依赖特征长度、特征速度和化学时间尺度的选取，对局部拉伸、差异扩散和壁面热损失的敏感性不足。*Ka* 及湍流预混燃烧区划能够反映小尺度湍流对火焰预热层和反应区的扰动强度，适合判断火焰处于皱褶火焰片、薄反应区或分布反应区等不同燃烧状态，但全局 *Ka* 并不能直接等同于火焰根部、剪切层或近壁区域的局部熄灭条件。Markstein 响应和火焰拉伸理论则更适合解释曲率、应变率及 *Le* 偏离对局部传播速度的影响，尤其适用于掺氢燃料、轻质燃料和差异扩散显著火焰

的局部稳定性分析；但在高湍流强度、复杂三维火焰面和强热声耦合条件下，Markstein 长度、局部拉伸率和火焰面法向的提取仍存在较大不确定性。

预混火焰稳定性常用物理量及其表征作用见表 1，预混火焰稳定性机理与表征框架如图 2 所示。由表 1 可见，上述判据并非相互替代关系，而是从整体边界、局部火焰响应、湍流小尺度扰动和热边界作用等不同角度共同表征预混火焰稳定性。因此，预混火焰稳定性判定应采用多指标综合分析，而不宜依赖单一边界量或单一无量纲数。由图 2 可见，预混火焰稳定性为整体尺度判据、局部火焰响应及燃烧器尺度共同作用的结果。整体尺度上，速度匹配和时间尺度比决定火焰能否维持；局部尺度上，火焰拉伸、火焰曲率、差异扩散与热损失控制局部传播能力；燃烧器尺度上，回流区结构、相干涡运动、几何参数和热边界条件进一步调制火焰根部稳定状态。

表 1 预混火焰稳定性常用物理量及其表征作用

Tab.1 Common quantities and their roles in premixed flame stability analysis

物理量/概念	典型表达或提取方式	主要尺度	解释作用	局限性
速度平衡	$u_n = S_L$	火焰面/喷口	描述火焰驻定的必要条件	难以解释强湍流和热边界耦合
达姆科勒数	$Da = \frac{\tau_{res}}{\tau_{chem}}$	整体/回流区	表征停留时间与反应时间竞争	对局部热损失和差异扩散不敏感
局部应变率	由速度梯度张量计算	剪切层/火焰根部	反映流动对火焰面的拉伸负荷	需高分辨率速度场
火焰拉伸率	$K = a_t + S_d\kappa$	火焰面局部	综合应变与曲率传播影响	依赖火焰面识别精度
马克斯坦响应	$S_d \approx S_L - L_M K$	火焰面局部	描述传播速度对拉伸的响应	强湍流和复杂燃料条件下 L_M 不易确定
卡尔洛维茨数	$Ka = \frac{\tau_{chem}}{\tau_\eta}$	湍流小尺度	表征小尺度湍流对反应区扰动	全局 Ka 不一定对应局部熄灭
壁面热通量	CHT 界面热流	近壁/固体耦合	反映热损失与热回流强度	需壁温测量或 CHT 约束

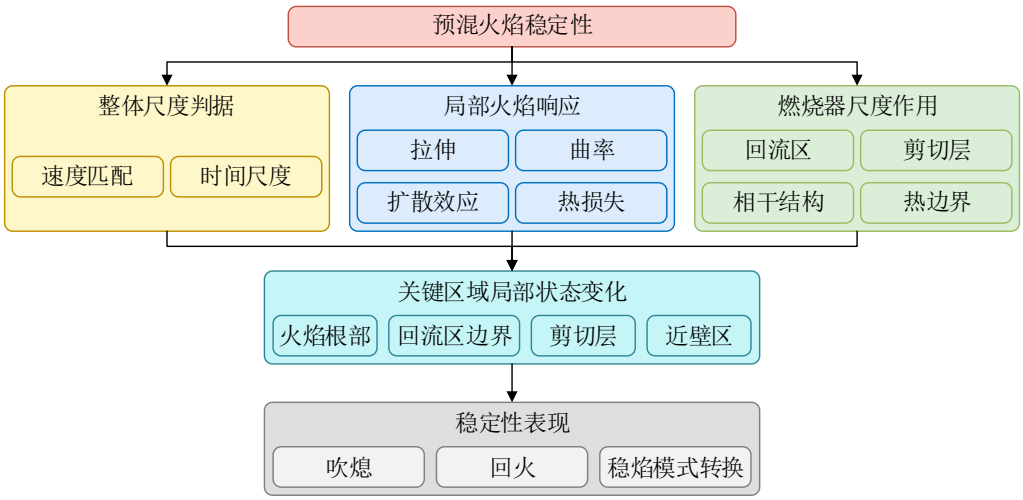


图 2 预混火焰稳定性机理与表征框架

Fig.2 Framework of mechanisms and characterization methods for premixed flame stability

2 关键区域识别与失稳路径的实验表征

实验研究在预混火焰稳定性分析中主要承担 2 项任务：一是测定吹熄、回火及稳焰模式转换的整体边界；二是在接近边界的工况下识别火焰根部、回流区、剪切层和近壁区域中的局部变化。随着高频激光诊断和同步采集技术的发展，实验研究已由早期火焰形态观察和极限参数测定，逐步转向对局部失稳过程的时空分辨测量。

2.1 实验诊断方法与关键表征量

当前预混火焰稳定性实验通常在几何参数和热边界条件明确的装置上开展参数扫描，控制变量包括平均来流速度、当量比、入口湍流强度、预热温度、稳焰器尺度以及喷口扩张角等。对于钝体、旋流、狭缝和多孔介质燃烧器，不同工况下的边界扫描可获得吹熄、回火及火焰形态转换区间，并为后续高速诊断选取近吹熄或近回火代表工况提供依据[4-6,30,34-44]。

从可测对象看，粒子图像测速（particle image velocimetry，PIV）、立体粒子图像测速（stereoscopic

PIV，SPIV）以及层析粒子图像测速（tomographic particle image velocimetry，Tomo-PIV）主要用于获取平均与瞬时速度场、回流区长度、停滞点位置、剪切层厚度以及速度梯度张量；平面激光诱导荧光（planar laser-induced fluorescence，PLIF）诊断技术中，OH-PLIF 通常用于识别高温反应区和火焰根部附着位置，CH_2O-PLIF 更适于表征预热层和低温反应层；OH*或 CH*化学发光成像适用于整体放热区间歇行为的统计分析[30,35,37,45-47]。

实验稳定性分析中的有效信息通常并不直接来自原始图像，而来自对原始数据构造的派生量。局部应变强度可由速度梯度张量计算，进度变量可由校正后的 PLIF 信号或温度/组分场归一化得到，局部间歇概率则可通过阈值识别统计某一位置被火焰占据的频率。上述派生量有助于将整体吹熄现象进一步解析为局部失稳起始位置、主导物理机制及其时空累积过程，从而为近极限工况下预混火焰稳定性机理分析提供定量依据。

2.2 火焰根部、回流区与近壁区域的近吹熄/回火动态

现有实验和数值研究表明，预混火焰整体吹熄通常并非全火焰面的同步失稳，而是优先起始于少数关键区域。对于钝体稳定火焰，优先失稳区主要位于火焰根部、尾流再循环区和主剪切层；对于旋流稳定火焰，则主要位于中心回流区、内外剪切层、下停滞点附近以及近壁边界层。Kariuki 等人[46]通过近吹熄甲烷/空气湍流预混火焰热释放成像观察到，整体吹熄前火焰热释放区会出现明显的间歇性减弱；Chaudhuri 等人[48]和 Shanbhogue 等人[32]对钝体稳定预混火焰吹熄动力学的研究进一步表明，火焰根部局部脱体、下游残余反应区短时维持以及再燃失败是吹熄过程中的关键阶段。对于旋流稳定火焰，Stöhr 等人[30]的燃气轮机模型燃烧室实验和 Taamallah 等人[33]关于旋流预混火焰稳焰模式的研究表明，中心回流区、内外剪切层及大尺度相干结构会显著影响局部熄灭位置、火焰片破碎和再燃过程。基于上述实验观测和数值模拟结果，对于以钝体尾流、中心回流区或局部高温产物回流实现稳焰的预混火焰，可将近吹熄过程中的典型局部失稳演化路径概括为火焰根部局部脱体、下游残余反应区短时维持、高温产物回卷、间歇再燃以及再燃失败等连续过程，近吹熄过程中的局部失稳路径如图 3 所示。

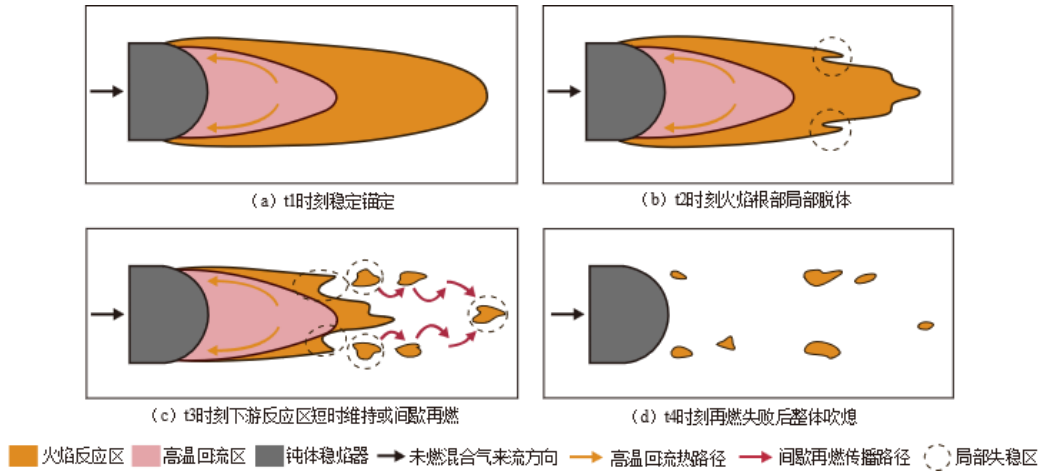


图 3 近吹熄过程中的局部失稳路径

Fig.3 Local instability pathway during lean blow-off

在钝体稳定预混火焰中，入口湍流增强后，湍流火焰厚度、平均火焰角度和火焰根部波动幅值均发生变化；但直接决定吹熄过程的是火焰根部局部脱体频率与尾流再循环补热能力之间的竞争关系[38,49]。当再循环区提供的热量和活性自由基能够覆盖局部脱体事件时，火焰可保持动态锚定；当局部脱体事件超过系统再燃能力时，局部熄灭会进一步扩展，并可能级联发展为整体吹熄。局部熄灭与整体稳定边界对应的物理尺度并不相同。局部脱体和局部熄灭通常首先发生在火焰结构及火焰根部控制区内，其特征长度与层流火焰厚度、预热层厚度、反应层厚度和湍流火焰刷厚度有关，多处于亚毫米至毫米量级；进一步扩展时，则主要涉及火焰根部、剪切层、回流区边界和近壁淬熄区等关键区域，一

般对应毫米至厘米量级。相比之下，整体稳定边界反映的是喷口尺度、回流区尺度、燃烧室特征长度以及声学和热边界共同作用下的装置尺度，通常为厘米至分米量级。因此，局部熄灭与整体吹熄之间并非简单的尺度放大关系，而是取决于局部失稳事件能否在关键区域内持续扩展，并超过回流补热和再燃恢复能力。

旋流预混火焰的近吹熄过程主要受中心回流区、内外剪切层及 PVC 对局部熄灭分布的调制作用影响。在带扩张段的可视化旋流燃烧器中，通常通过改变旋流数、中心喷流比、扩张段几何和当量比获得不同稳焰模式，并结合 PIV、OH-PLIF、OH* 化学发光成像及压力同步测量，识别火焰由回流区锚定向剪切层锚定、部分脱体乃至整体吹熄转变的动态路径[29-30,33,35,37,45,49-51]。

回火相关实验同样显示关键区域识别的重要性。Jeong 等人[45]利用高速 OH-PLIF/PIV 研究湍流预混钝体火焰中回火与燃烧不稳定的耦合，发现压力脉动诱导的瞬时逆压梯度可驱动近壁反向流动，并沿边界层推动火焰向上游传播。在狭缝不对称燃烧器和无回流涡稳定火焰中，壁面导热、局部曲率和热流重分布对回火及吹熄边界均表现出显著影响[6,42]。因此，火焰根部、下停滞点和近壁通道应成为实验测量和机理分析的重点。

2.3 热边界、几何参数与燃料性质对稳定边界的影响

与传统将热损失视为背景条件的处理不同，近年实验研究已将热边界条件提升为稳定性问题的核心变量。对于采用钝体等稳焰器实现火焰锚定且固体导热作用不可忽略的预混燃烧结构，稳焰器温度、材料热导率和外部散热条件不仅改变近壁未燃混合气预热水平，也直接影响火焰根部的附着位置及吹熄边界[4,34,39,41]。

几何因素对稳定边界的影响不能简化为单一尺度效应。旋流器喉口段长度、喷口扩张角、中心体结构和燃烧室扩张段结构会改变回流区范围、停滞点位置和剪切层曲率，从而影响稳焰模式和近吹熄裕度[35-36,50,52]。对于狭缝和窄通道火焰，几何不对称会引起双侧壁面热流和局部速度分布不均匀，进而改变甲烷火焰吹熄边界和氢气火焰回火边界[6]。

燃料性质通过层流燃烧速度、*Le* 和扩散特性改变局部传播能力及其对流动扰动的响应。氢组分增加通常提高燃烧速度并增强抗吹熄能力，但也提高近壁回火敏感性；低反应性燃料则更依赖预热、高温回流和局部停留时间。因此，燃料效应不宜仅通过单一极限流速或极限当量比比较，而应放在局部输运、火焰根部锚定方式和热边界共同变化的框架下讨论。

由表 2 可见，实验诊断的关键价值在于将整体稳定边界转化为可验证的局部量。边界扫描给出稳定范围，PIV 类方法提供速度梯度和回流结构，PLIF 类方法识别火焰面和预热层，化学发光揭示整体放热非定常行为，壁面测温则为热边界分析和 CHT 模型验证提供约束。

表 2 预混火焰稳定性实验诊断方法、可提取信息及主要误差/限制

Tab.2 Diagnostic methods, extractable information, and main errors/limitations for premixed flame stability

方法	测量对象	可提取量	适用问题	主要误差/限制
边界扫描与稳态/高速成像	整体火焰形态、运行边界	吹熄/回火边界、火焰长度、抬升高度、整体亮度	确定代表工况及整体稳定范围	主观阈值和判据会影响边界识别；高速成像只能反映投影火焰形态，难以直接给出局部速度和反应率
PIV/SPIV/Tomo-PIV	速度场、回流区、剪切层	速度矢量、CRZ 长度、停滞点位置、应变率、旋度、PVC 频率	分析流动组织和局部拉伸作用	近壁和强发光区粒子跟随性、反射、遮挡及空间分辨率限制会影响速度梯度和应变率计算
OH-PLIF / CH_2O-PLIF	反应区、预热层、火焰根部	火焰面位置、预热层厚度、湍流火焰厚度、间歇概率	识别局部熄灭、脱体和再燃过程	荧光信号受激光片不均匀性、碰撞淬灭、温度/压力依赖和标定误差影响，火焰面阈值需谨慎选取
OH* / CH*化学发光	整体放热区	放热区拓扑、强度波动、主频、相位关系	分析近吹熄和燃烧不稳定过程	本质为视线积分信号，难以直接区分三维放热结构和局部反应率；需与 PIV/PLIF 同步校核
红外测温/热电偶	壁面温度场、稳焰器热状态	壁温分布、近壁热通量变化趋势	评价热边界条件和 CHT 边界	热电偶存在响应滞后和导热误差；红外测温受发射率、视窗污染和壁面材料影响，热流反演不确定度较高

2.4 典型工程应用与技术瓶颈

面向燃气轮机、航空发动机、低碳燃料燃烧系统及小尺度热边界耦合燃烧器等工程场景，预混火焰稳定性调控的目标不仅是拓宽贫燃吹熄边界，还需兼顾回火抑制、燃烧不稳定控制、局部高温限制和污染物减排。相关调控策略通常围绕流动组织、

燃料喷注、预混均匀性、火焰根部锚定和壁面热反馈等方面展开。其主要瓶颈在于真实工况下光学诊断和边界条件测量难度较高，燃料差异扩散、热声耦合、近壁热损失和亚格子火焰响应等机制难以完全分离，数值模型仍需多源实验数据约束。表 3 概括了典型工程场景中的稳定性问题、主要调控手段和仍需突破的关键限制。

2.5 适用范围与局限

实验诊断方法的优势在于能够直接约束真实燃烧器中的整体边界和关键区域动态，但其适用性取决于光学可达性、时空分辨率和定量标定水平。PIV 适于揭示回流区、剪切层和速度梯度，但在近壁、强热释放和三维非定常流动中易受粒子跟随性和视角限制影响；PLIF 适于识别火焰面、预热层和局部熄灭区域，但荧光淬灭、激光片校正和阈值选取会影响定量结果；OH*/CH*化学发光适于获取全局放热振荡和近吹熄间歇性，但其线积分特性使其难以单独判定局部熄灭位置。因此，工程燃烧室稳定性研究通常需要采用边界扫描、PIV、PLIF、化学发光、压力脉动和壁温或热流测量的同步组合，而不宜依赖单一诊断手段。

表 3 典型工程场景中的预混火焰稳定性问题与调控瓶颈

Tab.3 Stability issues and control bottlenecks in typical premixed combustion systems

工程对象/应用场景	主要稳定性问题	典型调控手段	技术瓶颈
燃气轮机贫燃预混燃烧室	低负荷或快速变负荷下易发生贫燃吹熄，热释放脉动可能诱发燃烧不稳定	优化旋流数、喷嘴阻抗、燃料分级和预混均匀性，利用 CRZ 与剪切层维持火焰根部	真实压力和温度下光学诊断困难，热声耦合与局部熄灭机制难以解耦
航空发动机紧凑低排放燃烧室	宽工况下需兼顾点火、稳焰、低排放和回火安全裕度	采用钝体、旋流器和多点喷注调控停留时间、混合路径和火焰锚定位置	高空再点火、快速变工况和燃料变化下的局部稳定裕度预测仍不充分
掺氢及低碳燃料预混燃烧系统	燃料组分变化会改变燃烧速度、*Le* 效应和差异扩散特征，增加回火和热扩散不稳定风险	优化预混长度、喷孔尺度、近壁低速区和防回火结构，并通过燃料分级调控火焰位置	差异扩散和热扩散不稳定对实验诊断、火焰模型及 LES 预测精度影响显著
小尺度及强热边界耦合燃烧器	壁面热损失、导热回流和近壁淬熄直接改变火焰锚定位置和稳定边界	通过材料热导率、壁厚、外部散热和多孔/钝体结构调控热反馈	需耦合壁温测量、热流反演和 CHT 模拟，单纯流体域计算难以可靠预测

3 数值模拟在局部机理解析与工程尺度稳焰预测中的应用

数值模拟能够在统一计算框架内同时给出速度场、温度场、组分场、热释放率和壁面热通量等物理量，并可直接计算局部应变率、曲率、标量耗散率和火焰位移速度等实验中较难直接获取的参数。围绕预混火焰稳定性问题，现有研究已形成由直接数值模拟（direct numerical simulation，DNS）、大涡模拟（large eddy simulation，LES）和共轭传热（conjugate heat transfer，CHT）模拟构成的多层次方法体系。

3.1 DNS 对局部熄灭与再燃机理的解析

DNS 通过直接求解包含详细化学反应和分子输运的守恒方程，在充分分辨条件下解析全部相关湍流尺度。对于预混火焰稳定性问题，DNS 的主要作用在于将局部火焰结构、输运过程和化学反应置于同一时空框架内分析，从而给出实验中较难直接获得的局部量。

在稳定性问题中，DNS 通常并不直接针对完整工程燃烧器，而是围绕对冲火焰、自由传播火焰、喷流火焰和提升火焰等基础火焰结构展开。Giovangigli 和 Smooke[53]利用一维对冲火焰计算并结合伪弧长延拓方法获得完整的 C 形响应曲线，表明随着应变率增加，火焰会在临界熄灭点由稳定燃烧支突变到熄灭支。Cho 等人[26]则指出，基于局部拉伸火焰结构定义的局部 *Ka* 在熄灭时较传统全局 *Ka* 更接近统一表征。

围绕局部火焰结构，DNS 关注的重点已逐步转向局部熄灭的起始位置及其形成机制。Echekki 和 Chen[18]指出，局部传播速度、曲率和应变之间并不存在简单一一对应关系。Ahmed 等人[54]在湍流火焰与壁面相互作用研究中指出，近壁区域中的化学反应与流动作用难以简单分离。高 *Ka* 湍流预混火焰 DNS 结果进一步表明，即使在强湍流条件下，反应区仍可能保持一定层流火焰结构特征[22,24-25]。

局部熄灭后的再燃过程同样是 DNS 关注的重要内容。Bhide 等人[55]指出，局部熄灭区域内仍可能保留富集活性基团，并在湍流输运作用下触发再燃；Karami 等人[56]表明，再燃并非独立事件，而与局部混合恢复和自由基回输密切相关。Grout 等人[57]在横向射流火焰稳定研究中利用标量耗散率和流动拓扑分类识别锚定区域，指出火焰前缘的稳定与否取决于局部应变率、混合路径以及高温产物供给的共同作用。总体而言，DNS 在预混火焰稳定性研究中的作用主要体现在识别局部判据、提取主导物理量，并为 LES 模型构建和工程条件下的机理解释提供基础数据。

3.2 LES 对稳焰模式与近吹熄非定常过程的预测

LES 通过显式求解大尺度湍流结构，并对亚格子尺度速度涨落和燃烧反应进行建模，在可接受计算成本下实现复杂燃烧器内流动与燃烧过程计算。对于预混火焰稳定性问题，LES 的价值主要体现在保留燃烧器几何结构、入口边界和大尺度相干结构，以及连续表征平均场和非定常场。

从工程应用角度看，LES 已成为连接基础机理与燃烧室设计优化的重要工具。对于燃气轮机和航空发动机贫燃预混燃烧室，LES 可用于比较不同旋流器叶片角、喉口段长度、扩张段结构、燃料分级方式和喷注阻抗等条件下的回流区尺度、火焰根部位置、热释放振荡和近吹熄动态。已有实验与 LES 联合研究表明，燃烧器几何变化会通过改变 CRZ 位置、剪切层发展过程和标量耗散率分布影响稳焰模式[35,37]；喷注系统阻抗、火焰描述函数和声学阻尼则会共同决定热声不稳定响应[3]。因此，工程尺度 LES 的目标不应局限于再现平均温度场或平均速度场，而应进一步预测火焰根部间歇性、PVC 诱导的热释放响应、局部熄灭区域和吹熄裕度等与稳定性直接相关的动态指标。

对于总体仍保持清晰预混反应层的火焰，常采用基于层流火焰片、火焰生成流形（flame generated manifold，FGM）、火焰面进度变量（flamelet progress variable，FPV）、火焰面密度（flame surface density，FSD）或动态加厚火焰的进度变量模型。当研究重点集中于旋流燃烧器中的大尺度相干结构与火焰根部响应时，进度变量模型往往与动态 Smagorinsky、壁面自适应局部涡黏模型（WALE）或亚格子尺度（SGS）湍动能模型联合使用。模型选择的关键不在形式复杂程度，而在于能否同时再现局部传播、亚格子混合和热释放响应。

在燃烧器结构研究方面，LES 已广泛用于旋流燃烧器和钝体稳定火焰。Liu 等人[35]结合实验与 LES 研究不同喉口段尺寸对旋流火焰的影响，结果表明喉口段结构通过改变回流区位置和标量耗散率分布影响稳焰模式。Guo 等人[37]利用 PIV、PLIF 数据验证基于增厚火焰模型的 LES，指出动态亚格子模型对近吹熄条件下流动不稳定特征的再现更为合理。

LES 的局限主要体现在模型适用性上。对于低 *Le* 和高 *Ka* 条件下的预混火焰，差异扩散、局部熄灭和热扩散不稳定性会显著影响局部源项和火焰面结构，单一层流火焰片假设往往难以满足要求[10]。因此，LES 可信度不仅取决于平均场拟合程度，还取决于其能否同时再现火焰根部位置、CRZ 尺度、主频特征和间歇概率等多类约束量。

3.3 CHT 模拟及其在热边界稳焰问题中的应用

当研究对象涉及小尺度燃烧器、热回流通道或高导热稳焰器时，仅采用流体域计算难以准确描述真实热边界条件，因此需要引入 CHT。CHT 在流体守恒方程之外，还需在固体区域求解导热方程，并在流固界面施加温度连续和热流连续条件。

CHT 的意义不在于单纯增加固体温度场，而在于将稳焰器材料、壁厚、热导率、外部散热和接触热阻等因素纳入火焰稳定性分析，使近壁预热与热损失能够被定量讨论。Wan 等人[34]及 Wan 和 Zhao[4,41]等人围绕钝体等稳焰器预混火焰开展系列研究，指出忽略钝体内部热传导时，模型往往难以正确再现火焰根部锚定位置和吹熄边界。

Miguel-Brebion 等人[39]结合实验与数值研究指出，稳焰器温度升高会使火焰根部向上游移动并更接近稳焰器表面；Kedia 和 Ghoniem[40]利用二维 DNS 结合 CHT 研究钝体稳定层流预混火焰吹熄过程，指出吹熄起始于下游回流区内法向火焰传播速度梯度与法向流速梯度平衡被破坏的位置。

对于狭缝燃烧器、热回流燃烧器和多孔介质燃烧器，CHT 的作用更加直接。Chen 和 Ronney[5]的研究结果表明，当系统尺度减小且热回流增强时，边界热损失与内部导热会显著改变稳定边界；Pers 等人[6]指出，几何不对称可通过辅助火焰与壁面导热改变主流道预热水平，并同时影响吹熄与回火边界。

3.4 适用范围与局限

基于上述分析，DNS、LES 与 CHT 在预混火焰稳定性研究中并非相互替代关系，而是分别侧重局部机理解析、燃烧器尺度非定常预测和热边界耦合分析，其适用性取决于燃烧结构、研究尺度和主导失稳机制。

DNS 可直接解析详细化学反应、分子输运、局部熄灭和再燃等微观过程，适用于对冲火焰、自由传播火焰、提升火焰、壁面淬熄火焰和简化喷流火焰等基础结构。其优势在于可获得局部应变率、曲率、标量耗散率、火焰位移速度、自由基输运和局部热释放结构，为局部稳定性判据提取及 LES 模型构建提供基础数据。但 DNS 对网格分辨率、时间步长和化学机理要求较高，计算成本随雷诺数、压力和几何复杂度迅速增加，通常难以直接用于完整燃气轮机或航空发动机燃烧室。因此，将 DNS 中获得的局部判据推广至工程燃烧室时，仍需进行尺度转换并结合实验验证。

LES 在可接受计算成本下保留复杂燃烧器几何、回流区、剪切层、进动涡核和大尺度相干结构，适用于旋流燃烧器、钝体稳焰燃烧器、分级燃烧室及近吹熄非定常过程预测。其优势在于可同时表征

平均流场和瞬态火焰响应，用于分析旋流器结构、喉口段长度、扩张段形式、燃料分级方式和喷注系统阻抗等因素对火焰根部位置、回流区尺度、热释放振荡和稳焰模式转换的影响。但 LES 结果受亚格子燃烧模型、入口湍流边界、网格分辨率、化学机理简化和壁面热边界处理影响。在高 *Ka*、低 *Le*、掺氢差异扩散显著及局部熄灭与再燃频繁发生的工况下，传统火焰片或进度变量模型可能难以准确描述反应区破碎、热扩散不稳定性和局部源项变化。

CHT 将固体导热、壁面热通量、稳焰器温度和热回流纳入计算框架，适用于小尺度燃烧器、热回流燃烧器、多孔介质燃烧器、近壁火焰及导热稳焰结构。其优势在于能够描述壁面热损失、固体预热、热回流与火焰根部锚定之间的耦合关系，尤其适于分析壁面导热对吹熄边界、回火边界和火焰附着位置的影响。但 CHT 对材料热物性、壁厚、接触热阻、外部散热条件、辐射模型和流固界面边界条件较为敏感；若缺少壁温、热流或红外测温等实验约束，火焰位置和稳定边界预测可能存在偏差。

因此，数值模拟应根据研究目标分层选用：局部熄灭、再燃、差异扩散和火焰面结构演化宜采用 DNS；实际燃烧器中的回流区组织、稳焰模式转换和近吹熄非定常过程宜采用 LES；近壁热损失、热回流和固体导热主导的问题则需引入 CHT。对于工程燃烧室，单一数值方法难以完整覆盖全部失稳机制，应结合 PIV、PLIF、化学发光、压力脉动和壁温测量等实验结果，对火焰根部位置、回流区尺度、局部熄灭区域、主频特征、壁面热状态和整体稳定边界进行多指标校核。数值模拟在预混火焰稳定性研究中的多层次作用关系如图 4 所示。

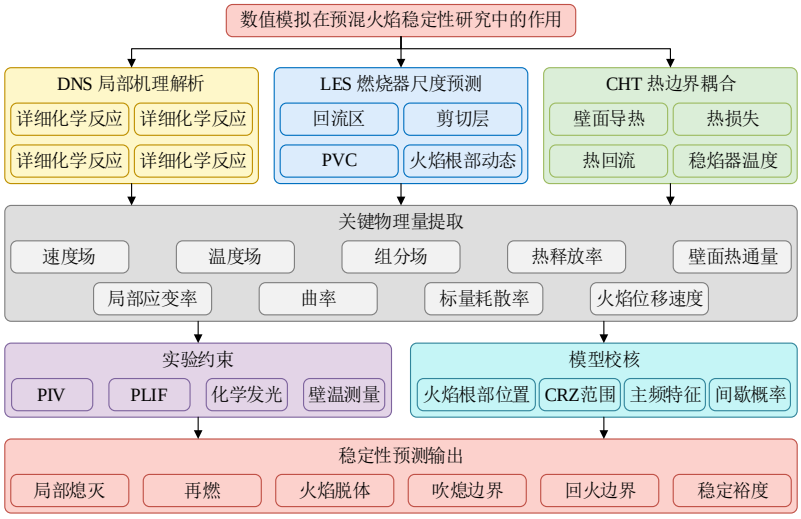


图 4　预混火焰稳定性研究中的多层次数值模拟框架

Fig.4 Multilevel numerical simulation framework for premixed flame stability

4 总　结

本文围绕预混火焰稳定性机理与表征方法，梳理了理论判据、实验诊断和数值模拟的研究进展。总体来看，预混火焰稳定性不宜仅由极限当量比或极限流速等宏观边界参数表征，而应结合整体稳定边界、关键区域局部失稳及其向吹熄或回火发展的演化过程进行分析。理论分析可明确主导物理量，实验诊断可识别失稳位置和动态路径，数值模拟可解析三维流动、燃烧与热边界耦合作用。三者相互补充，是建立局部失稳特征量与整体稳定边界关联的重要基础。

1）预混火焰稳定性本质上取决于局部反应维持能力与流动拉伸、混合耗散、停留时间及热损失之间的竞争关系。整体吹熄、回火和稳焰模式转换通常并非全火焰面同步失稳，而是由火焰根部、剪切层、回流区边界和近壁区域的局部反应减弱、火焰脱体、上游传播或再燃失败逐步发展而成。

2）不同稳定性判据对应不同物理尺度和适用条件。速度匹配关系与 *Da* 主要反映整体稳焰和停留时间约束；火焰拉伸率、曲率、Markstein 响应、*Le* 效应和 *Ka* 更适合解释局部传播能力变化及局部熄灭倾向。因此，实际燃烧器稳定性评价不宜依赖单一无量纲数，而应综合考虑全局边界、局部火焰响应、流动组织和热边界作用。

3）实验诊断已由单纯测定吹熄或回火边界，逐步转向关键区域识别和近极限动态过程解析。PIV、PLIF、高速化学发光、压力脉动及壁温或热流测量等多模态手段，可从速度场、火焰结构、热释放波动和热边界状态等方面揭示局部失稳的起

始位置和演化路径，并为理论判据修正和数值模型验证提供约束。

4）DNS、LES 与 CHT 在预混火焰稳定性研究中具有互补作用。DNS 适于解析局部熄灭、再燃和差异扩散等微观过程；LES 适于描述实际燃烧器中的流动组织、稳焰模式转换和近吹熄非定常行为；CHT 则适于分析壁面导热、热损失和热回流对火焰锚定及稳定边界的影响。数值模拟结果应结合关键区域位置、流动结构、热释放特征和整体稳定边界进行综合验证。

5 展　望

面向高效、低排放、宽工况燃烧系统的工程需求，预混火焰稳定性研究可在以下方向持续深化。

1）深化关键区域高时空分辨多模态同步诊断技术研究。应系统构建火焰根部、回流区边界、剪切层及近壁区域瞬态结构的高分辨率表征体系，突破传统测量对局部熄灭、火焰脱体和间歇再燃等瞬态事件捕捉不足的限制。未来可进一步发展 PIV、PLIF、高速化学发光、压力脉动及壁温或热流测量的同步诊断方法，提取局部停留时间、应变强度、火焰间歇概率和壁面热反馈等关键特征量，为关键区域主导的失稳机理分析提供高质量实验数据支撑。

2）建立局部失稳过程与整体稳定边界的跨尺度关联模型。应突破现有判据在整体尺度与局部尺度之间相互割裂的局限，构建融合速度匹配、时间尺度、局部拉伸响应、湍流区划和燃烧器内流热耦合作用的综合分析框架。重点阐明火焰根部、剪切层、回流区边界和近壁区域的局部状态如何影响整体吹熄、回火及稳焰模式转换，形成可解释、可推广的跨尺度判据体系，为工程稳定边界预测提供理论基础。

3）发展实验约束下的多物理场耦合数值模拟方法。应发挥 DNS、LES 和 CHT 在局部机理、工程尺度预测和热边界耦合分析中的互补作用，并结合 PIV、PLIF、化学发光、压力脉动及壁温或热流测量等多源实验数据开展联合验证，提高复杂工况下数值模拟结果的可靠性。在此基础上，可引入物理约束人工智能方法和数据驱动降阶模型，用于多源数据融合、失稳模式识别和稳定边界快速预测。

4）系统揭示复杂燃料与宽工况条件下的预混火焰稳定机制。应重点阐明掺氢、含氨及多组分低碳燃料中差异扩散、热扩散不稳定性、层流燃烧速度变化和近壁传播特性对吹熄、回火及稳焰边界的影响规律。相关研究不宜仅停留在极限当量比或极限流速对比层面，而应从局部输运、火焰根部锚定、热反馈和再燃能力等角度揭示复杂燃料条件下的失稳路径变化，为低碳燃料适配、稳定燃烧控制和异常预警提供支撑。

［参 考 文 献］

［1］ Morgans A S, Yang D. Thermoacoustic instability in combustors[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2025, 57: 9.

［2］ Beita J, Talibi M, Sadasivuni S, et al. Thermoacoustic instability considerations for high hydrogen combustion in lean premixed gas turbine combustors: a review[J]. Hydrogen, 2021, 2(1): 33.

［3］Soundararajan P R, Durox D, Renaud A, et al. Swirler effects on combustion instabilities analyzed with measured FDFs, injector impedances and damping rates[J]. Combustion and Flame, 2022, 238: 111947.

［4］ Wan J L, Zhao H B. Effect of conjugate heat exchange of flame holder on laminar premixed flame stabilization in a meso-scale diverging combustor[J]. Energy, 2020, 198: 117294.

［5］ Chen C H, Ronney P D. Scale and geometry effects on heat-recirculating combustors[J]. Combustion Theory and Modelling, 2013, 17(5): 888.

［6］ Pers H, Masset P A, Flores-Montoya E, et al. Influence of slit asymmetry on blow-off and flashback in methane/hydrogen laminar premixed burners[J]. Combustion and Flame, 2024, 263: 113413.

［7］ Berger L, Attili A, Pitsch H. Intrinsic instabilities in premixed hydrogen flames: parametric variation of pressure, equivalence ratio, and temperature. Part 1—dispersion relations in the linear regime[J]. Combustion and Flame, 2022, 240: 111935.

［8］ Berger L, Attili A, Pitsch H. Intrinsic instabilities in premixed Hydrogen flames: parametric variation of pressure, equivalence ratio, and temperature. Part 2—non-linear regime and flame speed enhancement[J]. Combustion and Flame, 2022, 240: 111936.

［9］ Howarth T L, Hunt E F, Aspden A J. Thermodiffusively-unstable lean premixed Hydrogen flames: phenomenology, empirical modelling, and thermal leading points[J]. Combustion and Flame, 2023, 253: 112811.

［10］Berger L, Attili A, Gauding M, et al. LES combustion model for premixed turbulent hydrogen flames with thermodiffusive instabilities: a priori and a posteriori analysis[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2025, 1003: A33.

［11］Wohl K, Kapp N M, Gazley C. The stability of open flames[C]//Symposium on Combustion and Flame, and Explosion Phenomena. [S.l.]: Elsevier, 1948: 3.

［12］Longwell J P, Weiss M A. High temperature reaction rates in hydrocarbon combustion[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1955, 47(8): 1634.

［13］Karlovitz B, Denniston D W Jr, Knapschaefer D H, et al. Studies on turbulent flames: A. Flame propagation across velocity gradients B. Turbulence measurement in flames[C]//Symposium (International) on Combustion. [S.l.]: Elsevier, 1953: 613.

［14］Markstein G H. Nonsteady flame propagation[M]. New York: Pergamon Press, 1964.

［15］Clavin P, Williams F A. Effects of molecular diffusion and of thermal expansion on the structure and dynamics of premixed flames in turbulent flows of large scale and low intensity[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 116: 251.

［16］Law C K. Dynamics of stretched flames[C]//Symposium (International) on Combustion. [S.l.]: Elsevier, 1989: 1381.

［17］Creta F, Matalon M. Propagation of wrinkled turbulent flames in the context of hydrodynamic theory[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 680: 225.

［18］Echekki T, Chen J H. Unsteady strain rate and curvature effects in turbulent premixed methane-air flames[J]. Combustion and Flame, 1996, 106(1/2): 184.

［19］Peters N. Laminar flamelet concepts in turbulent combustion[C]//Symposium (International) on Combustion. [S.l.]: Elsevier, 1988: 1231.

［20］Peters N. Turbulent combustion[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

［21］Poinsot T, Veynante D, Candel S. Quenching processes and premixed turbulent combustion diagrams[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 228: 561.

［22］Nilsson T, Carlsson H, Yu R X, et al. Structures of turbulent premixed flames in the high Karlovitz number regime—DNS analysis[J]. Fuel, 2018, 216: 627.

［23］Zhang Y, Kang Y H, Huang X M, et al. DNS study of freely propagating turbulent lean-premixed flames with low-temperature chemistry in the broken reaction zone regime[J]. Energies, 2025, 18(16): 4357.

［24］Wang H O, Hawkes E R, Chen J H. Turbulence-flame interactions in DNS of a laboratory high Karlovitz premixed turbulent jet flame[J]. Physics of Fluids, 2016, 28(9): 095107.

［25］Wang X J. Direct numerical simulation of lean premixed turbulent flames at high Karlovitz numbers under elevated pressures[D]. London: University College London, 2019.

［26］Cho E S, Chung S H, Oh T K. Local Karlovitz numbers at extinction for various fuels in counterflow premixed flames[J]. Combustion Science and Technology, 2006, 178(9): 1559.

［27］Syred N, Beér J M. Combustion in swirling flows: a review[J]. Combustion and Flame, 1974, 23(2): 143.

［28］Candel S, Durox D, Schuller T, et al. Dynamics of swirling flames[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46(1): 147.

［29］Karlis E, Liu Y S, Hardalupas Y, et al. Extinction strain rate suppression of the precessing vortex core in a swirl stabilised combustor and consequences for thermoacoustic oscillations[J]. Combustion and Flame, 2020, 211: 229.

［30］Stöhr M, Boxx I, Carter C, et al. Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2953.

［31］Zukoski E E, Marble F E. Experiments concerning the mechanism of flame blowoff from bluff bodies[C]//Proceedings of the Gas Dynamics Symposium on Aerothermochemistry. Evanston: Northwestern University, 1956: 205.

［32］Shanbhogue S J, Husain S, Lieuwen T. Lean blowoff of bluff body stabilized flames: scaling and dynamics[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(1): 98.

［33］Taamallah S, Shanbhogue S J, Ghoniem A F. Turbulent flame stabilization modes in premixed swirl

combustion: physical mechanism and Karlovitz number-based criterion[J]. Combustion and Flame, 2016, 166: 19.

［34］Wan J L, Fan A W, Yao H, et al. Experimental investigation and numerical analysis on the blow-off limits of premixed CH_4/air flames in a mesoscale bluff-body combustor[J]. Energy, 2016, 113: 193.

［35］Liu X, Elbaz A M, Gong C, et al. Effect of burner geometry on swirl stabilized methane/air flames: a joint LES/OH-PLIF/PIV study[J]. Fuel, 2017, 207: 533.

［36］Saediamiri M, Birouk M, Kozinski J A. Flame stability limits of low swirl burner–effect of fuel composition and burner geometry[J]. Fuel, 2017, 208: 410.

［37］Guo S L, Wang J H, Zhang W J, et al. Investigation on bluff-body and swirl stabilized flames near lean blowoff with PIV/PLIF measurements and LES modelling[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160: 114021.

［38］Roy R, Cetegen B M. Dynamics of 2D, V-shaped bluff-body stabilized turbulent premixed flames near and away from blowoff with different gaseous fuels[J]. Combustion Science and Technology, 2021, 193(12): 2023.

［39］Miguel-Brebion M, Mejia D, Xavier P, et al. Joint experimental and numerical study of the influence of flame holder temperature on the stabilization of a laminar methane flame on a cylinder[J]. Combustion and Flame, 2016, 172: 153.

［40］Kedia K S, Ghoniem A F. The blow-off mechanism of a bluff-body stabilized laminar premixed flame[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(4): 1304.

［41］Wan J L, Zhao H B. Blow-off mechanism of a holder-stabilized laminar premixed flame in a preheated mesoscale combustor[J]. Combustion and Flame, 2020, 220: 358.

［42］Vance F H, Shoshin Y, De Goey L P H, et al. An investigation into flashback and blow-off for premixed flames stabilized without a recirculation vortex[J]. Combustion and Flame, 2022, 235: 111690.

［43］El-Mahallawy F, Abdelhafez A, Mansour M S. Mixing and nozzle geometry effects on flame structure and stability[J]. Combustion Science and Technology, 2007, 179(1/2): 249.

［44］李炜, 刘鑫鑫, 尹钦禾, 等. 孔隙密度对多孔介质燃烧器燃烧特性影响[J]. 中国石油大学学报（自然科学版）, 2024, 48(5): 176.

Li W, Liu X X, Yin Q H, et al. Effect of void density on combustion characteristics of porous medium burners[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(5): 176.

［45］Jeong C, Bae J, Kim T, et al. Investigation of flashback characteristics coupled with combustion instability in turbulent premixed bluff body flames using high-speed OH-PLIF and PIV[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 1861.

［46］Kariuki J, Dowlut A, Yuan R, et al. Heat release imaging in turbulent premixed methane–air flames close to blow-off[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 1443.

［47］Osborne J R, Ramji S A, Carter C D, et al. Relationship between local reaction rate and flame structure in turbulent premixed flames from simultaneous 10 kHz TPIV, OH PLIF, and CH_2O PLIF[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 1835.

［48］Chaudhuri S, Kostka S, Renfro M W, et al. Blowoff dynamics of bluff body stabilized turbulent premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(4): 790.

［49］Chowdhury B R, Cetegen B M. Experimental study of the effects of free stream turbulence on characteristics and flame structure of bluff-body stabilized conical lean premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2017, 178: 311.

［50］Becker L G, Kosaka H, Böhm B, et al. Experimental investigation of flame stabilization inside the quarl of an oxyfuel swirl burner[J]. Fuel, 2017, 201: 124.

［51］Chakchak S, Hidouri A, Ghabi A, et al. Experimental investigation on the stability of turbulent swirling methane/air-O_2 flames[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2023, 141: 110772.

［52］Zhou L X. Comparison of studies on flow and flame structures in different swirl combustors[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 80: 29.

［53］Giovangigli V, Smooke M D. Extinction of

strained premixed laminar flames with complex chemistry[J]. Combustion Science and Technology, 1987, 53(1): 23.

［54］Ahmed U, Doan N A K, Lai J W, et al. Multiscale analysis of head-on quenching premixed turbulent flames[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(10): 105102.

［55］Bhide K G, Sreedhara S. A DNS study on turbulence-chemistry interaction in lean premixed syngas flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(43): 23615.

［56］Karami S, Talei M, Hawkes E R, et al. Local extinction and reignition mechanism in a turbulent lifted flame: a direct numerical simulation study[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 1685.

［57］Grout R W, Gruber A, Yoo C S, et al. Direct numerical simulation of flame stabilization downstream of a transverse fuel jet in cross-flow[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 1629.

（责任编辑　邓玲惠）