

航空发动机主燃烧室动态燃烧研究 现状及关键技术分析

王 波¹, 惠 鑫², 李 锋³, 程 明⁴, 张 漫⁵, 杨金虎⁶

(1. 南方科技大学 力学与航空航天工程系, 广东 深圳 518055;

2. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

4. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;

5. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241;

6. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100083)

摘 要: 阐述了动态燃烧的内涵, 从先进军用和民用发动机的需求出发, 强调了开展主燃烧室动态燃烧研究、支撑燃烧室精细化设计的重要性。对国内外动态燃烧研究进行了总结, 从基础研究、模型燃烧室研究、数值模拟研究及工程应用四方面将国内外情况进行了对比。分析了开展动态燃烧研究的难点, 梳理了我国开展动态燃烧研究需攻克的四大关键技术, 并阐述了其内涵及可采取的技术路径。基于我国先进军民用发动机需求和国内研究现状, 提出了建立数据库、发展设计方法、构建理论体系及培养研究队伍等合理化建议。

关 键 词: 主燃烧室; 动态燃烧; 过渡态; 非定常仿真; 光学诊断

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Research status and key technology analysis of dynamic combustion in aero-engine main combustor

WANG Bo¹, HUI Xin², LI Feng³, CHENG Ming⁴, ZHANG Man⁵, YANG Jinhui⁶

(1. Department of Mechanics and Aerospace Engineering,

Southern University of Science and Technology, Shenzhen Guangdong 518055, China;

2. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

4. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;

5. Commercial Aircraft Engine Company Limited,

Aero Engine Corporation of China, Shanghai 200241, China;

6. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The essence of dynamic combustion was explained. Based on the requirements of both military and civil aircraft engines, the importance of conducting dynamic combustion technologies and supporting the optimization design of aero-engine combustors was highlighted. The research progress on

收稿日期: 2022-04-19

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-III-0002-0045, 2017-III-0002-0026); 国家自然科学基金 (92041001)

作者简介: 王波 (1988—), 男, 副研究员、硕士生导师, 博士, 主要从事航空发动机燃烧研究。

通信作者: 李锋 (1966—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机燃烧研究。E-mail: lifeng1966@buaa.edu.cn

引用格式: 王波, 惠鑫, 李锋, 等. 航空发动机主燃烧室动态燃烧研究现状及关键技术分析[J]. 航空动力学报, 2022, 37(11): 2479-2487. WANG Bo, HUI Xin, LI Feng, et al. Research status and key technology analysis of dynamic combustion in aero-engine main combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(11): 2479-2487.

dynamic combustion technologies was summarized and compared from domestic and foreign aspects in terms of fundamental research, model combustor research, numerical simulation, and engineering application. The challenges in developing dynamic combustion technologies were analyzed, four key technologies to be developed in China were presented, and their connotation and technical pathways were expounded. Based on the design requirements of advanced engines along with current dynamic combustion progress, suggestions including establishing database, developing design methods, building theoretical system and training research teams, were put forward for developing dynamic combustion technologies in China.

Keywords: main combustor; dynamic combustion; transition state; unsteady simulation; optical diagnostic

航空发动机主燃烧室内流动具有强烈的三维非定常特征,燃烧室中旋涡生成与破碎,液体燃料喷射、雾化、蒸发、混合及燃烧反应等过程存在复杂的流动与燃烧相互耦合作用,这导致主燃烧室的燃烧过程是动态变化的,即动态燃烧。燃烧室内的动态燃烧主要表现在流动、喷雾、火焰结构、燃烧组分、温度、压力等物理场(量)的快速动态变化,变化频率从数十赫兹到数千赫兹。

主燃烧室动态燃烧包含两个类型:①在发动机稳定工作状态下,燃烧室空气、燃料的进口压力、温度、流量等宏观参数时均稳定,尽管燃烧室中物理场的时均分布没有变化,但这些物理场随时间脉动;②在发动机过渡工作状态,如点熄火、变工况(起动、加减速、转级等)过程,燃烧室空气、燃料的进口参数快速变化,燃烧室中物理场随时间发生大范围动态变化,不存在稳定的时均分布。由于国内外关于燃烧室点熄火过程的研究已较为充分,本文讨论的过渡工作状态主要指变工况过程。

在传统的以时均参数为基础的燃烧室设计中,由于燃烧室稳定工作边界、涡轮材料耐温等留有较大的裕度,开展动态燃烧研究的需求还不十分迫切,然而动态燃烧对发动机使用的影响已有所体现,如燃烧室、涡轮部件达不到预期的使用寿命等。随着新一代军用发动机和民用发动机性能要求的大幅提升,燃烧室难以维持以往宽裕度的设计,因此基于燃烧室动态燃烧特征开展燃烧室精细化设计,对未来高性能发动机燃烧室的研发具有极强的重要性和必要性。

1 航空发动机动态燃烧研究需求分析

1.1 军用发动机主燃烧室动态燃烧研究需求分析

目前,军用发动机主燃烧室朝高温升方向发展,高温升燃烧室大状态工作的油气比很高,先

进高温升燃烧室出口的平均温度正逐步逼近涡轮部件的耐温极限,如图 1 所示,图中 T_4 为燃烧室出口温度。基于降低排气冒烟的考虑,高温升燃烧室必须增大头部空气进气量,降低主燃区燃烧当量比,导致熄火特性恶化的同时,用于冷却和掺混的空气总量减少。高温升燃烧室的热负荷相比常规燃烧室大大增加,为了保证火焰筒的寿命,冷却空气量不能大幅降低,因此掺混空气势必减少甚至取消,这对高温升燃烧室出口温度分布调节提出了巨大挑战。

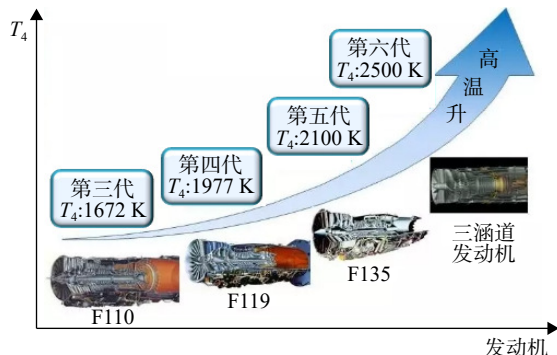


图 1 军用发动机高温升燃烧室出口温度变化趋势

Fig. 1 Trend of combustor outlet temperature of military aero-engine

燃烧室出口温度分布系数(OTDF)是高温升燃烧室设计的重要性能指标,本研究团队在前期的高温升燃烧室研发中发现,以稳态时均 OTDF 为指标设计的高温升燃烧室,其使用寿命常低于预期值。在出口平均温度提高、掺混空气减少情况下,如果稳定工作状态燃烧室出口温度随时间脉动的幅值较大,极有可能出现实际最高温度早已超过涡轮耐温极限。另外,过渡工作状态下燃烧室进口参数快速变化容易造成火焰外伸,导致燃烧室的实际出口温度已远超涡轮等热端部件材料的耐温极限,进而造成所设计的高温升燃烧室

的使用寿命低于预期值。因此, 先进高温升燃烧室的设计和性能提升对于动态燃烧特性的研究需求十分强烈。

针对高温升燃烧室稳定工作状态出口温度分布调试需求, 高温升燃烧室的稳定工作状态主要需开展燃烧室流场、液雾浓度场、燃烧组分场、燃烧室出口温度场随时间变化特征的研究, 获得燃烧室进口参数脉动对燃烧室流动、火焰温度、燃烧室压力以及出口温度等参数动态特性的影响机制与规律。

针对高温升燃烧室过渡态下的火焰外伸控制需要, 高温升燃烧室的过渡工作状态需要开展燃烧室进口状态变化(压力、温度、流量、油气比变化)对高温升燃烧室火焰长度、出口温度等关键参数的影响研究, 从而获得并验证过渡态边界条件对高温升燃烧室动态特性的影响机制与规律。

1.2 民用发动机动态燃烧研究的需求分析

低排放是先进民用航空发动机适航取证的必须要求, 国际民航组织(ICAO)颁布了一系列排放标准, 其中氮氧化物(NO_x)排放规定日趋严苛^[1-2]。航空发动机燃烧室中以热力型 NO_x 为主导, 实现低 NO_x 的关键手段是控制燃烧温度, 消除局部高温区。贫油预混预蒸发燃烧是当前最主要低排放技术之一, 其基本原理是增加头部空气进气量, 降低主燃区燃烧当量比, 并结合燃料与空气预混实现高效均匀燃烧。GE 公司的双环预混旋流器(TAPS)系列燃烧室采用贫油预混燃烧, 获得了巨大的商业成功。我国自主研发用于 C919 大飞机的 CJ-1000A 发动机, 也采用了贫油预混预蒸发的技术路线。

然而, 贫油预混燃烧容易出现燃烧不稳定的现象, 并且由于大量空气从火焰筒头部进入, 火焰筒壁上主燃孔和掺混孔的进气减少或取消, 火焰筒的声学阻尼作用显著减小。如果燃烧室设计不得当, 极易引发燃烧振荡现象, 振荡时强力的压力脉动会导致燃烧室乃至整个发动机振动加剧, 发出巨大的燃烧噪声, 影响发动机的整体性能, 严重时甚至破坏发动机部件^[3], 如图 2 所示。另一方面, 燃烧室中的燃烧脉动, 会导致局部高温区出现, 也会影响排气污染物的控制。因此, 低排放燃烧室的设计和性能提升对于动态燃烧特性的研究需求十分强烈。

针对低排放燃烧室稳定工作状态振荡燃烧的抑制需要, 主要需开展燃烧室流场、液雾浓度场、

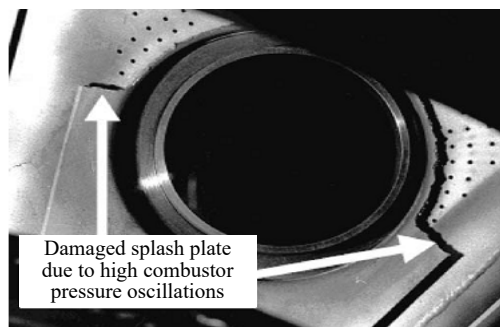


图 2 脉动压力对燃烧室结构的损坏^[3]

Fig. 2 Structural damage of combustor caused by pressure oscillation^[3]

燃烧组分场、燃烧室出口温度场等随时间变化特性研究, 获得燃烧室进口参数脉动对燃烧室流动、雾化、压力、燃烧组分等参数动态特性的影响机制与规律。

针对低排放燃烧室所关注的过渡态下的出口火焰脉动、内部燃烧压力脉动控制需求, 需要开展燃烧室进口状态变化对低排放燃烧室出口火焰长度、燃烧室压力脉动、污染物排放等关键参数的影响研究, 从而获得并验证过渡态边界条件对低排放燃烧室动态特性的影响机制及规律。

2 国内外主燃烧室动态燃烧研究现状

2.1 动态燃烧的基础研究

国际上对简单开放火焰的动态燃烧过程展开了深入的光学测试研究, 其特点是没有限制域, 火焰以甲烷、氢气等射流或旋流火焰为主, 测试频率在几千赫兹到百千赫兹范围, 测试区域一般较小, 以便获得高空间分辨率。美国俄亥俄州立大学对射流火焰的演变过程进行了研究^[4-5], 首次展示了非预混火焰多帧高频的 CH 自由基反应层的演化规律, 并捕捉了火焰褶皱引发局部熄火的机制, 如图 3 所示。美国普渡大学、美国空军实验室利用多台高速相机开展了 20 kHz 射流火焰甲醛激光诱导荧光(CH_2O -PLIF)和丙酮 PLIF 多角度测试, 据此进行射流火焰时间和空间重构^[6], 研究结果对深入认识火焰三维结构及开展高精度数值仿真有较大帮助。美国桑迪亚国家实验室则使用层析粒子成像测速(TPIV)和 PLIF 测试了射流火焰的高频三维流场和平面 OH 组分场^[7], 指出高火焰拉伸率引起局部熄火是火焰的固有结构。美国艾奥瓦州立大学利用超高频脉冲群激光器, 成功实现了 100 kHz 的射流火焰 CH_2O -PLIF 测试^[8], 将研究的时间尺度缩小至 10 μs 。瑞典隆德大学

对一种低旋简单火焰采用多种高频测试手段进行了研究^[9-10],揭示了抬升火焰的稳定机制,指出速度脉动对火焰前沿的褶皱有强烈影响。基础火焰的研究加深了动态燃烧基本过程的认识,有助于动态燃烧基础理论发展。

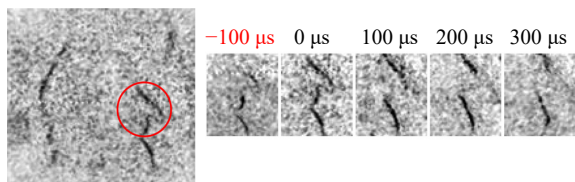


图 3 CH-PLIF 序列揭示火焰褶皱可能引起局部熄灭^[4]

Fig. 3 CH PLIF image sequence highlighting possible extinction due to flame wrinkling^[4]

国际上对光学燃烧室中的动态燃烧也开展了丰富的研究,其特点是有限域,以常压、气态燃料旋流火焰为主,测试频率一般不高于 10 kHz。日本东京工业大学针对使用甲烷预混的单级旋流模型燃烧室,开展了多平面流场和燃烧组分同步高频测试^[11-12],展示了旋流火焰复杂的三维细节结构,指出未燃区的火焰拉伸率明显较高,火焰前沿的最小曲率半径与 Kolmogorov 尺度吻合。德国宇航中心针对使用甲烷燃料的双级旋流模型燃烧室,开展了大量的粒子图像测速(PIV)及 OH-PLIF 同步高频诊断,对双旋流火焰的火焰稳定、湍流与火焰相互作用、火焰动态特性等诸多问题进行了深入研究^[13-22]。图 4 展示了根部火焰与旋涡进动核心(PVC)的相互作用机制,图中 x 代表径向方向, y 代表轴向方向, v 代表平面上的二维合速度。这些测试揭示了模型燃烧室内多物理场耦合机制,为深入认识燃烧室动态燃烧过程演变提供了支撑。

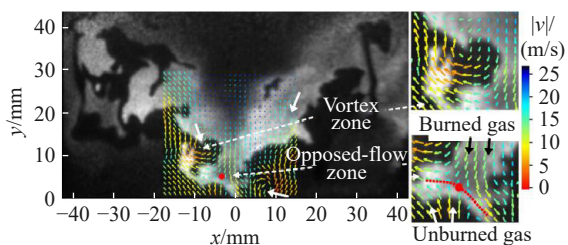


图 4 旋流火焰的火焰根部与 PVC 相互作用^[14]

Fig. 4 Swirl flame root interaction with PVC^[14]

国内在采用光学诊断技术探究燃烧演变规律方面也开展了探索性研究。上海交通大学采用 20 kHz 高重复频率激光开展了一系列气态燃料燃烧测试研究。研究分别采用了 SO_2 -PLIF 和

CH_2O -PLIF 对火焰面进行了捕捉^[23-24]。利用激光诱导白炽光(LII)和 PIV 方法测量了乙烯空气扩散火焰的碳烟分布和速度场分布^[25]。针对旋流预混火焰采用 CH_2O -PLIF 和 PIV 同步测量的方法,研究了声激励下火焰响应机理和特性^[26-27]。针对射流火焰采用 CH_2O -PLIF 和 PIV 同步测量的方法研究了射流出口涡的生成对火焰的作用机制^[28]。西北核技术研究所开展了非线性双线钢原子荧光测温方法、OH 示踪测速技术、一维自发拉曼散射测量方法等的研究^[29],针对光学燃烧室内部燃烧流场的演变过程进行了研究。天津大学开展了飞秒双光子激光诱导荧光测量火焰中 CO 的研究^[30]。

2.2 液雾燃烧模型燃烧室动态燃烧研究现状

近年来,燃烧室的光学测试朝着加压试验环境、液态燃料、高频多组分同步测试的方向发展。美国普渡大学针对 TAPS 头部方案的光学燃烧室开展了 PIV/OH-PLIF 同步测试,测试频率为 5 kHz。普渡大学的试验测试压力最高达到 1.8 MPa。为了实现 PLIF 测试,试验选择 Petro-SAPS-150 燃料,这种燃料芳香烃含量极低,避免了 Jet-A 燃料多种芳香烃的荧光信号对 OH 荧光信号的干扰^[31]。该研究详细介绍了燃烧室复杂环境下光学测试手段及后处理方法,并对燃烧室流动结构及大功率下流动与火焰相互作用进行了初步分析。

美国佐治亚理工学院针对 TALON 燃烧室的双旋流气动雾化喷嘴,在试验压力为 0.2~0.5 MPa 下,开展了 Jet-A 和 C-5 两种液态燃料火焰的 PIV/Fuel-PLIF/OH-PLIF 同步测试^[32],测试频率达到 5 kHz,获得了流场、喷雾场和燃烧场的高频动态分布结果,如图 5 所示,图中 IRZ 代表内回流区,ORZ 代表外回流区, D_0 为喷嘴直径。研究指出,燃烧室在不同的当量比下,火焰分布形态差异较大,可能对释热特性、燃烧不稳定性、排放等有影响,并阐明了火焰分布位置与流场、喷雾的相对关系。

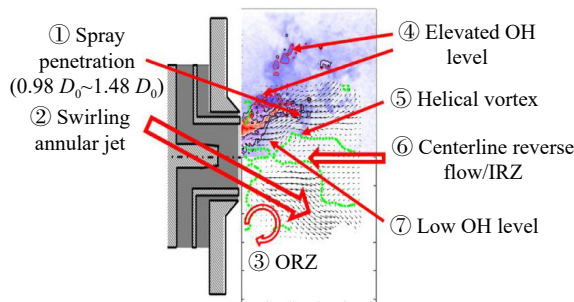


图 5 燃烧室中瞬态流动、油雾、火焰分布关系^[32]

Fig. 5 Instantaneous flow, spray and flame distribution in combustor^[32]

相比气态燃料火焰研究, 液体燃料火焰研究的工况与环境更复杂, 更接近实际燃烧室。为提高测试的可信度和信噪比, 燃烧室内物理场的测试需在时域和光谱域进行十分精细的控制。国际上针对液雾火焰模型燃烧室的研究结果, 加深了对加压条件下液雾火焰结构、大功率下火焰与火焰作用、流动喷雾火焰多物理场耦合的认识, 为工程型号的研制和性能优化指明了方向。

国内南方科技大学对高温升燃烧室开展了 10 kHz 流场和低频 Fuel-PLIF 测试研究^[33], 研究观察到了燃烧室中两级旋流气流交汇时的 PVC 运动, 指出流场的不稳定流动与燃油分布具有较强关联性。中国科学院工程热物理研究所^[34-35]、北京航空航天大学^[36]等对气动雾化喷嘴喷雾分布开展了时均测量和分析。然而, 针对燃烧室内部复杂湍流两相液雾燃烧的动态测试研究, 目前鲜有研究报道。

2.3 动态燃烧数值模拟研究现状

大涡模拟(LES)是开展动态燃烧数值研究的重要手段, 国际上针对简单火焰动态过程的数值模拟方法日趋成熟^[37-39], 近年来开始关注真实燃烧室的动态燃烧。Yang 等采用大涡模拟的方法计算了旋流杯内部流场^[37], 文氏管下游尾迹中出现了由于 Kelvin-Helmholtz 不稳定性所引起的高频涡脱落, 研究还展示了旋流杯中 PVC 的存在以及涡核生成、发展过程。Boudier 等^[38]和 James 等^[39]分别针对 Turbomeca 发动机燃烧室和 R-R 发动机燃烧室开展了数值研究, 结果表明, 相比于雷诺应力平均(RANS)计算方法, 大涡模拟计算的燃烧室出口径向温度分布系数(RTDF)更接近于试验值。Staffelbach 等开展了单头部燃烧室与多头部燃烧室的大涡模拟研究^[40], 研究中发现单头部和多头部燃烧室冷态的 PVC 运动频率相同, 热态时单头部燃烧室 PVC 运动频率增大, 多头部燃烧室会出现周向模态。

随着大规模并行计算能力提升, 一些研究者开展了全环燃烧室动态燃烧的模拟。Staffelbach 等通过大涡模拟捕捉到了直升机发动机全环燃烧室自发燃烧不稳定现象^[41], 分析认为燃烧室中存在两种幅值不等周向叠加的脉动模态, 对燃烧室不同头部的空气流量和火焰来回振荡进行调制, 导致释热脉动并引发燃烧不稳定性。研究中发现不同头部的火焰传递函数是相同的, 进一步确定了周向模态对不同头部空气流量的调制作用。该

研究还指出, 通过大涡模拟获取火焰传递函数, 对全环燃烧室改进和性能优化有较大帮助。

国内外针对过渡态的数值模拟研究较少。北京航空航天大学通过动态设定燃烧室气动边界条件和燃烧室供油规律, 模拟了发动机加速过渡态燃烧室三维两相燃烧流场的变化过程^[42]。计算结果表明, 某时刻过渡态温度场与对应工况参数的稳态计算结果相比, 过渡态计算的出口温度沿周向分布更加不均匀(75% 叶高位置尤为突出), 如图 6 所示, 图中 Z、Y 代表燃烧室出口截面的两个正交方向。研究还对过渡态计算步长设置、过渡态相对稳态结果的滞后性等进行了分析。该研究表明燃烧室过渡态物理场及燃烧室性能与稳态有较大差异, 需在燃烧室过渡态燃烧研究中重点关注。

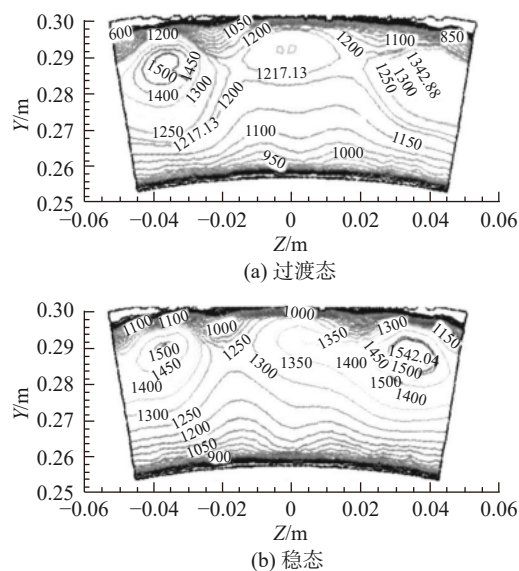


图 6 过渡态与稳态计算的出口温度对比^[42]

Fig. 6 Comparison of simulated outlet temperature between transient state and steady state^[42]

大涡模拟虽然加深了人们对燃烧室动态燃烧细节的认识, 但由于真实燃烧室边界条件复杂, 网格尺寸及非定常过程时间尺度等跨度较大, 燃油雾化及多组分燃料燃烧的模型精度有待提高, 大涡模拟在真实燃烧室中的应用仍需开展详细的研究。借助于面向真实燃烧室的光学诊断技术, 获取燃烧室内流动、喷雾、燃烧组分、温度等物理场信息, 可为动态燃烧数值模拟和模型验证提供有力支撑。

2.4 动态燃烧研究在燃烧室设计中应用情况

美国的 GE 公司为满足民用大涵道比涡扇发动机 GENx 的污染排放需求, 设计了具有分级分区预混预蒸发燃烧气动热力特征的 TAPS 低排放

燃烧室。TAPS 低排放燃烧室在技术成熟度 2~3 级的研发阶段,主要依靠光学测试进行机理研究和原理方案验证。辛辛那提大学^[43-44]采用 PIV 和激光多普勒测速(LDV)等光学诊断方法,对 TAPS 燃烧室主燃级燃油横向喷射、预燃级喷射进行了测量,揭示了气流速度、液滴速度、穿透深度等射流的影响机理,支撑了主/预燃级燃油喷嘴的设计。密歇根大学^[45-48]在光学模型燃烧室上针对 TAPS 燃烧室的流场与火焰相互作用以及不稳定性问题,开展 PIV 和 PLIF 测量,获得了流场和火焰结构的动态特性,确定了中心分级火焰相互作用对火焰不稳定性的影响规律,并应用于 TAPS 燃烧室燃烧不稳定性问题的解决和主动抑制技术研发中,如图 7 所示,图中 p' 代表脉动压力, u' 代表脉动速度。同时在 TAPS 燃烧室研发过程中,分别在单头部和多头部模型燃烧室进行了 LTO(landing and take-off)循环排放、燃烧效率、点熄火、耐久性、不稳定性、自燃裕度测试,研究基于单头部/多头部试验数据,完成了设计方案的优化,最后在全环试验台上进行了最终的排放、效率、脉动压力特性以及出口温度分布的验证^[49-50],成功支撑了先进的 TAPS 低排放燃烧室的研发和优化。

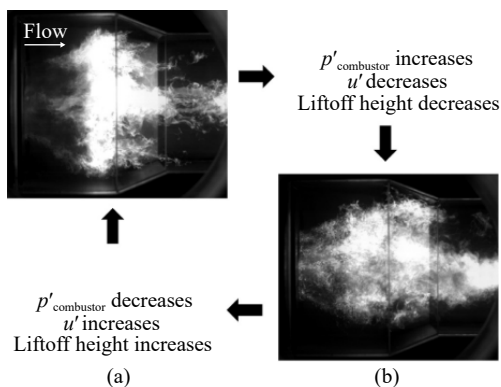


图 7 TAPS 燃烧室燃烧不稳定性机理^[45]

Fig. 7 Combustion instability mechanism of TAPS combustor^[45]

普惠公司采用富燃-猝熄-贫燃的低排放燃烧方案的 TALON 燃烧室用于 PW1000 发动机。美国佐治亚理工学院获取了该燃烧室的流场、油雾场和燃烧组分场的高频同步数据,并分析了这些动态物理场与火焰稳定的关联性^[32]。罗罗公司发展的 Lean-burn 低排放燃烧室技术,已经在核心机上进行了验证。剑桥大学发展了一种图像处理算法,来分析 Lean-burn 燃烧室点火过程火焰运动和分裂^[51]。德国宇航中心拍摄了 Lean-burn 燃烧室

高空再点火动态过程,并结合 Fuel-PLIF 和 OH-PLIF 测试结果,分析了火焰与油雾的位置关系^[52]。

目前国内基本具备燃烧室性能测试的试验系统,北京航空航天大学和中国航发商用航空发动机有限责任公司在发展民用大型涡扇发动机低排放燃烧室方案中,针对低排放燃烧室的点火、熄火、燃烧效率、燃烧不稳定性、污染排放等性能开展研究,并且采用少量的低频时均光学诊断技术对部分状态和燃烧过程的演变开展研究,支撑了低排放燃烧技术方案的研发过程,最终提出具有自主知识产权的搅拌旋流低排放燃烧 TeLESS I 和 TeLESS II 两代低排放燃烧室框架方案^[36,53-55]。近年来,以该低排放燃烧室框架方案为背景,又对分层火焰的结构、火焰相互作用、脉动压力、火焰迟滞等动态特性进行了深入研究^[56-60]。但这些研究主要以高速摄像和动态压力测试为基础,缺乏燃烧室内流动、燃烧场的细节。

综上所述,欧美等发达国家借助先进非接触激光诊断和非定常数值模拟技术,深入认识了工程型号燃烧室流动与燃烧的动态特征,部分工作对工程研制起到了一定支撑作用。国内测试和仿真技术相对落后,对先进航空发动机燃烧室精细化设计支撑作用亟需提升。

3 我国航空发动机动态燃烧研究关键技术分析

从设计体系角度而言,主燃烧室精细化设计和性能提升的核心是通过对燃烧室流场、油雾分布场、火焰形态及出口温度分布等特性的动态变化规律及影响因素开展深入研究,形成燃烧室动态特性基础理论以及分析、预测和调控方法。

根据高温升与低排放燃烧室的主要工作模式、工况条件以及性能需求,以及从现有的主燃烧室稳态和动态研究经验,可以分析出开展燃烧室动态燃烧特性研究的主要挑战和难点为:①燃烧室流动与燃烧动态特性的高时空分辨率测量难;②燃烧室流动与燃烧动态特性非定常数值仿真预测难;③燃烧室过渡工作状态模化试验方法难;④燃烧室动态特性基础理论以及分析、预测和调控方法形成困难。因此,燃烧室动态燃烧研究应针对以上难点开展相应关键技术攻关研究,具体关键技术如下所述:

关键技术一:主燃烧室旋流液雾燃烧高频诊断技术。利用高频激光测试手段,对高温升与低

排放燃烧室燃烧组织中的旋流流动、燃油雾化、燃烧等动态过程进行光学诊断。主要解决: ①受限空间旋流流场特征的动态测量; ②燃油浓度场的动态测量; ③火焰重要燃烧自由基的动态测量; ④燃烧室温度高频测量技术。燃烧室旋流液雾燃烧环境十分复杂, 对高频激光诊断提出了挑战。在 PIV 流场测量中, 需要修正燃油颗粒发出的散射信号对示踪粒子信号的干扰。在激光诱导荧光技术应用方面, 在近真实燃烧室条件下, 复杂的组分及高温条件导致不同组分在光谱域上存在不同程度的串扰, 需要对不同组分的激发与探测机制进行精细研究, 提高测量组分信号的置信度及探测效率; 同时针对加压环境的测试, 应尽可能采用更高能量的激发激光并优化光路、采集系统配置, 以提高测试信噪比。燃烧室温度非接触测量一直是本领域的难点, 应该培育调谐二极管激光器吸收光谱技术(TDLAS)、双线 PLIF 及滤波瑞利等多种高频测温手段, 并推动这些测量手段在燃烧室中的应用。

关键技术二: 主燃烧室宽尺度多物理场耦合非定常仿真技术。目的在于构建高精度非定常两相反应流燃烧数值仿真模型, 对燃烧室进口稳定状态下的宽频动态压力脉动特征、随流场发展的温度特征等进行预测仿真, 对燃烧室进口过渡态下的燃烧室内气动热力参数的变化进行仿真计算。燃烧室流动及燃烧的宽尺度特征、复杂物理化学过程以及过渡态进出口边界处理等, 对高精度动态燃烧仿真提出了挑战。该关键技术需在充分认识燃烧室中的复杂湍流燃烧的时间尺度特征基础上, 根据研究对象所呈现出的时间尺度特征, 有针对性地选择时间推进或时间精确的数值仿真方法, 发展时间关联效应的燃烧室稳态与过渡工作状态燃烧计算分析方法与工程预测方法。

关键技术三: 燃烧室过渡工作状态模化试验方法。目的在于建立发动机过渡工作状态模拟试验系统, 掌握燃烧室过渡状态边界条件调节规律, 为过渡工作状态下燃烧室多参数多物理场特性研究提供试验环境与方法。试验需要模拟发动机从慢车到最大状态的加速过程、从最大状态到慢车的减速过程以及分级燃烧室转级过渡态的空气和燃油参数变化规律, 这对试验平台的设计与试验状态的测控方法提出了巨大挑战。研究应根据燃烧室设计参数, 包括流量、进口压力、进口温度、压力损失、燃烧室温升等参数, 确定加减速过渡

工作状态时各参数变化速率与耦合特性, 从而对发动机燃烧室实际过渡工作状态进行模化模拟, 保证模化试验状态下燃烧室参数变化特征、燃烧室内流动与燃烧动态特性与实际燃烧室过渡状态下相同或相似。

关键技术四: 主燃烧室流动与燃烧动态特性理论构建。针对主燃烧室稳态和过渡态下流动与燃烧动态变化问题, 探索燃烧室中喷雾、流动与火焰之间的相互作用机理, 结合湍流流动、掺混、燃烧等动态过程研究中获得的设计、测试、试验方法和试验结果, 分析非定常脉动参数、过渡态边界条件对高温升和低排放燃烧室稳态与过渡态下动态燃烧特性的影响规律。总结燃烧室流动与燃烧动态特性研究的数据、规律、机理、模型, 形成燃烧室流动与燃烧动态特性基础理论, 包含: ①非定常脉动特性对燃烧室稳态与动态特性指标的影响机制; ②过渡态边界条件对燃烧室稳态与动态特性指标的影响机制; ③基于燃烧室动态燃烧的出口温度场调控方法; ④基于燃烧室动态燃烧的压力脉动调控方法等。

4 对我国开展动态燃烧研究建议

根据前述动态燃烧研究需求、发展现状及关键技术分析, 对我国开展动态燃烧研究提出如下建议:

一是开展主燃烧室流动与燃烧动态特性的高频试验测量和时间关联效应的动态特性数值仿真技术研究, 建立流场、液雾浓度场、燃烧组分场、温度场等动态特性试验测量和数值仿真数据库, 为先进高温升和低排放燃烧室的研发提供新的试验测量和数值仿真工具。

二是在研究影响燃烧室流动与燃烧动态特性的敏感可控参数的基础上, 以先进高温升和低排放主燃烧室流动与燃烧动态特性为基础构建燃烧室设计方法, 从考虑稳态(时均)燃烧特性发展到综合考虑稳态和动态燃烧特性的燃烧室设计方法与准则。

三是开展单头部、多头部、全环燃烧室的动态特性调控优化与考核验证研究, 形成燃烧室动态特性基础理论, 发展燃烧室流动与燃烧动态特性的预测与调控优化方法。

四是借助国内一流的科研力量培养我国的高温升和低排放主燃烧室流动及燃烧动态特性研究人才队伍, 具备从基础理论到工程实践不同层次

的研究能力,将相关的研究成果应用于先进小涵道比涡扇发动机高温升燃烧室和大型客机发动机低排放燃烧室的研制,支撑未来我国先进航空发动机高温升和低排放主燃烧室的精细化设计发展。

5 结 论

本文基于先进军用与民用航空发动机燃烧室的设计需求,阐述了开展主燃烧室动态燃烧研究的重要性和必要性。重点总结了国内外关于动态燃烧的研究现状,指出了国内动态燃烧在基础研究、模型燃烧室研究、数值模拟研究及工程应用等四方面与国外存在较大差距。本文分析了开展动态燃烧研究在光学测量、高精度仿真、试验技术及基础理论等方面的难点,由此梳理了我国开展动态燃烧研究的主要关键技术,并阐述了关键技术路线与实施方案。为推动我国开展航空发动机燃烧室动态燃烧特性研究,提出了建立数据库、发展设计方法、构建理论体系及培养研究队伍等合理化建议。

参考文献:

- [1] 林宇震,许全宏,刘高恩.燃气轮机燃烧室[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 彭云晖,许全宏,张弛,等.我国大飞机发动机低污染燃烧室发展考虑[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年年会,深圳:中国航空学会,2007:748-754.
- [3] LIEUWEN T C, YANG V. Combustion instabilities in gas turbine engines:operational experience, fundamental mechanisms and modeling[M]. Arlington, US:American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [4] JIANG N, PATTON R A, LEMPERT W R, et al. Development of high-repetition rate CH PLIF imaging in turbulent nonpremixed flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 767-774.
- [5] GABET K N, PATTON R A, JIANG N, et al. High-speed CH_2O PLIF imaging in turbulent flames using a pulse-burst laser system[J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(3):569-575.
- [6] HALLS B R, GORD J R, MEYER T R, et al. 20-kHz-rate three-dimensional tomographic imaging of the concentration field in a turbulent jet[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 4611-4618.
- [7] CORITON B, STEINBERG A M, FRANK J H, et al. High-speed tomographic PIV and OH PLIF measurements in turbulent reactive flows[J]. *Experiments in Fluids*, 2014, 55(6): 1743.
- [8] MICHAEL J B, VENKATESWARAN P, MILLER J D, et al. 100-kHz thousand-frame burst-mode planar imaging in turbulent flames [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 739-742.
- [9] PETERSSON P, OLOFSSON J, BRACKMAN C, et al. Simultaneous PIV/OH-PLIF, Rayleigh thermometry/OH-PLIF and stereo PIV measurements in a low-swirl flame[J]. *Applied Optics*, 2007, 46 (19): 3928-3936.
- [10] PETERSSON P, WELLANDER R, OLOFSSON J, et al. Simultaneous high-speed PIV and OH PLIF measurements and modal analysis for investigating flame-flow interaction in a low swirl flame[R]. Lisbon:16th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2012.
- [11] TANAHASHI M, MURAKAMI S, CHOI G M, et al. Simultaneous CH-OH PLIF and stereoscopic PIV measurements of turbulent premixed flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 1665-1672.
- [12] DENNIS C N, SLABAUGH C D, BOXX I G, et al. 5 kHz thermometry in a swirl-stabilized gas turbine model combustor using chirped probe pulse femtosecond CARS.Part 1: temporally resolved swirl-flame thermometry[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 173: 441-453.
- [13] SLABAUGH C D, DENNIS C N, BOXX I G, et al. 5 kHz thermometry in a swirl-stabilized gas turbine model combustor using chirped probe pulse femtosecond CARS.Part 2: analysis of swirl flame dynamics[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 173: 454-467.
- [14] STÖHR M, BOXX I G, CARTER C D, 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): 2953-2960.
- [15] STÖHR M, BOXX I G, CARTER C D, et al. Experimental study of vortex-flame interaction in a gas turbine model combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(8): 2636-2649.
- [16] STÖHR M, ARNDT C M, MEIER W. Effects of Damköhler number on vortex-flame interaction in a gas turbine model combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 3107-3115.
- [17] BOXX I, SLABAUGH C, KUTNE P, et al. 3-kHz PIV/OH-PLIF measurements in a gas turbine combustor at elevated pressure[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3793-3802.
- [18] BOXX I, ARNDT C M, CARTER C D, et al. High-speed laser diagnostics for the study of flame dynamics in a lean premixed gas turbine model combustor[J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(3): 555-567.
- [19] SLABAUGH C D, BOXX I G, WERNER S, et al.High-speed measurements in partially-premixed swirl flames at elevated temperature and pressure[R].AIAA 2015-0670, 2015.
- [20] SADANANDAN R, STÖHR M, MEIER W. Simultaneous OH-PLIF and PIV measurements in a gas turbine model combustor[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3): 609-618.
- [21] SLABAUGH C D, BOXX I, WERNER S, et al. Structure and dynamics of premixed swirl flames at elevated power density[J]. *AIAA Journal*, 2016, 54(3): 946-961.
- [22] BOXX I, CARTER C D, STÖHR M, et al. Study of the mechanisms for flame stabilization in gas turbine model combustors using kHz laser diagnostics[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(5): 1532.1-1532.22.
- [23] GAO Y, YANG X, FU C, et al. 10 kHz simultaneous PIV/PLIF study of the diffusion flame response to periodic acoustic forcing[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(10): C112-C120.
- [24] YANG X, FU C, WANG G, et al. Simultaneous high-speed SO_2 PLIF imaging and stereo-PIV measurements in premixed swirling flame at 20 kHz[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(10): C121-C129.
- [25] FU C, YANG X, LI Z, et al. Experimental investigation on an acoustically forced flame with simultaneous high-speed LII and stereo PIV at 20 kHz[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(10): C104-C111.
- [26] WANG S R, LIU X C, WANG G Q, et al. High-repetition rate burst-mode-laser diagnostics of an unconfined lean premixed swirling flame under external acoustic excitation[J]. *Applied Optics*,

- 2019, 58(10): C68-C78.
- [27] WANG G, LIU X, XIA X, et al. Dynamics of periodically-excited vortices in swirling flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(4): 6183-6191.
- [28] XIA X, FU C, YANG Y, et al. Vortex formation and frequency tuning of periodically-excited jet diffusion flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(2): 2067-2074.
- [29] TAO B, HU Z, FAN W, et al. Novel method for quantitative and real-time measurements on engine combustion at varying pressure based on the wavelength modulation spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): A762-A776.
- [30] LI B, LI X, ZHANG D, et al. Comprehensive CO detection in flames using femtosecond two-photon laser-induced fluorescence[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25809-25818.
- [31] SLABAUGH C D, PRATT A C, LUCHT R P. Simultaneous 5 kHz OH-PLIF/PIV for the study of turbulent combustion at engine conditions[J]. *Applied Physics B*, 2015, 118(1): 109-130.
- [32] CHTEREV I, ROCK N, EK H, et al. Simultaneous imaging of fuel, OH, and three component velocity fields in high pressure, liquid fueled, swirl stabilized flames at 5 kHz[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 186: 150-165.
- [33] LI L A, LI X, WANG Z, et al. Experimental investigation of the flow-spray field in a realistic concentric staged high temperature rise combustor[J]. *Fuel*, 2022, 318: 123606.1-123606.10.
- [34] LIU C, LIU F, MAO Y, et al. Experimental investigation of performance of an air blast atomizer by planar laser sheet imaging technique[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014, 136(2): 021601.1-021601.8.
- [35] LIU C, LIU F, YANG J, et al. Investigations of the effects of spray characteristics on the flame pattern and combustion stability of a swirl-cup combustor[J]. *Fuel*, 2015, 139: 529-536.
- [36] WANG B, ZHANG C, LIN Y Z, et al. Influence of main swirler vane angle on the ignition performance of Teless-II combustor[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017, 139(1): 011501.1-011501.8.
- [37] WANG S, YANG V, GEORGE H, et al. Large-eddy simulations of gas-turbine swirl injector flow dynamics[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 583: 99-122.
- [38] BOUDIER G, GICQUEL L Y M, POINSOT T, et al. Comparison of LES, RANS and experiments in an aeronautical gas turbine combustion chamber[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 3075-3082.
- [39] JAMES S, ZHU J, ANAND M. Large eddy simulation as a design tool for gas turbine combustion systems[J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(4): 674-86.
- [40] BENOIT L, NICOUD F. Numerical assessment of thermo-acoustic instabilities in gas turbines[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2005, 47(8/9): 849-855.
- [41] STAFFELBACH G, GICQUEL L, BOUDIER G, et al. Large eddy simulation of self-excited azimuthal modes in annular combustors[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2909-2916.
- [42] 王慧汝, 金捷, 刘大响. 过渡态工况下环形燃烧室热态三维数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(2): 314-319.
WANG Huiru, JIN Jie, LIU Daxiang. Numerical simulation of three-dimension combustion in an annular combustor during a transient state[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(2): 314-319. (in Chinese)
- [43] ELSHAMY O, TAMBE S, CAI J, et al. Structure of liquid jets in subsonic crossflow at elevated ambient pressures[R]. AIAA 2006-1224, 2006.
- [44] ELSHAMY O, TAMBE S, CAI J, et al. PIV and LDV measurements for liquid jets in crossflow[R]. AIAA 2007-1338, 2007.
- [45] TEMME J E, ALLISON P M, DRISCOLL J F. Combustion instability of a lean premixed prevaporized gas turbine combustor studied using phase-averaged PIV[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(4): 958-970.
- [46] DHANUKA S K, TEMME J E, DRISCOLL J F, et al. Vortex-shedding and mixing layer effects on periodic flashback in a lean premixed prevaporized gas turbine combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2901-2908.
- [47] DHANUKA S K, TEMME J E, DRISCOLL J. Unsteady aspects of lean premixed prevaporized gas turbine combustors: flame-flame interactions[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(3): 631-641.
- [48] DHANUKA S K, TEMME J E, DRISCOLL J. Lean-limit combustion instabilities of a lean premixed prevaporized gas turbine combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2961-2966.
- [49] FOUST M, THOMSEN D, STICKLES R, et al. Development of the GE aviation low emissions TAPS combustor for next generation aircraft engines[R]. AIAA 2012-0936, 2012.
- [50] LEE C M. NASA project develops next generation low-emissions combustor technologies[R]. AIAA 2013-0540, 2013.
- [51] READ R W, ROGERSON J W, HOCHGREB S. Flame imaging of gas-turbine relight[J]. *AIAA Journal*, 2010, 48(9): 1916-1927.
- [52] MOSBACH T, SADANANDAN R, MEIER W, et al. Experimental analysis of altitude relight under realistic conditions using laser and high-speed video techniques[R]. ASME Paper GT2010-22625, 2010.
- [53] HAN X, LAERA D, YANG D, et al. Flame interactions in a stratified swirl burner: Flame stabilization, combustion instabilities and beating oscillations[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 212: 500-509.
- [54] YANG S, ZHANG C, LIN Y, et al. Experimental investigation of the ignition process in a separated dual-swirl spray flame[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 219: 161-177.
- [55] WANG Z, LIN Y, WANG J, et al. Experimental study on NO emission correlation of fuel staged combustion in a LPP combustor at high pressure based on NO-chemiluminescence[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(2): 550-560.
- [56] HAN X, LAERA D, MORGANS A S, et al. The effect of stratification ratio on the macrostructure of stratified swirl flames: experimental and numerical study[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018, 140(12): 121004.1-121004.10.
- [57] QIN H, LIN Y, LI J. Precessing motion in stratified radial swirl flow[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(2): 386-394.
- [58] WANG X Y, HAN X, SONG H, et al. Combustion instabilities with different degrees of premixedness in a separated dual-swirl burner[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2020, 142(6): 06101201.1-06101201.10.
- [59] HAN X, LAERA D, MORGANS A S, et al. Inlet temperature driven supercritical bifurcation of combustion instabilities in a lean premixed prevaporized combustor[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 109: 109857.1-109857.11.
- [60] HAN X, LAERA D, MORGANS A S, et al. Flame macrostructures and thermoacoustic instabilities in stratified swirling flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 5377-5384.