

航空发动机燃烧室点火研究概述

刘正艺, 陈溯敏, 周孙宇

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘要: 航空发动机燃烧室的点火性能决定着发动机的稳定工作范围。点火性能研究始于20世纪70年代, 涉及经验公式提出、关键参数预测、数值模型构建、全环点火过程观测等, 并随着高速摄像、粒子图像测速系统、相位多普勒粒子分析仪等测试手段的介入, 使得点火研究范围越来越宽泛。本文概述了燃烧室点火研究成果, 总结了影响燃烧室点火性能的主要因素, 提出了点火性能改善方案, 可为航空发动机燃烧室点火设计提供参考。

关键词: 航空发动机; 燃烧室; 点火特性预测; 数值模拟; 试验研究

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2021) 06-0051-05

The research on aero-engine combustor ignition

LIU Zheng-yi, CHEN Su-min, ZHOU Sun-yu

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: The ignition performance of aero-engine combustion chamber determines the stable working range of the engine. The research on ignition performance began in the 1970s, involving the proposal of empirical formulas, the prediction of key parameters, the construction of numerical models, the observation of the whole ring ignition process, etc. With the intervention of high-speed camera, partial image velocimetry system, phase Doppler partial analyzer and other test means, the scope of ignition research is becoming wider and wider. The research results of combustion chamber ignition were presented, the main factors affecting the ignition performance of combustion chamber were summarized, and the improvement scheme of ignition performance was put forward, which can provide reference for the ignition design of aero-engine combustion chamber.

Key words: aero-engine; combustor; ignition performance prediction; numerical simulation; experimental research

1 引言

确保航空发动机在极端环境(高寒点火)和特殊情况(高空点火)下点火启动成功, 即具有较宽广的稳定燃烧工作范围, 是实现发动机运行高可靠性和高安全性的关键。发动机燃烧室的点火过程极为复杂, 涉及到小尺度的火焰与湍流的耦合, 且影响点火过程及周向点火时间的因素错综复杂。目前, 火焰的详细发展过程仍处于观测探索阶段, 即其物理过程尚未被完全掌握和认识, 理论建设、经验模型、数值计算和试验技术均存在一定挑战^[1]。

随着发动机推重比的不断提升, 发动机对燃烧室升温、稳定工作范围以及出口温度分布的要求越来越苛刻。为适应燃烧室热容增加, 主燃区气流量相应增大, 稳定火焰难度提升。此外, 随着航空污染物排放标准的提高, 分级燃烧室应运而生, 但该类燃烧室的头部进气量较高, 易导致其在低工况下火焰难稳定且点/熄火性能难保证。为此, 需进一步深入开展航空发动机燃烧室稳定性设计, 而点火相关研究能对其起支撑和指导作用。

本文通过对国内外多篇航空发动机燃烧室点火

研究领域公开文献进行分类统计,介绍了目前点火研究的基本概况,并对点火研究的重点内容——点火特性预测方法、数值模拟方法、试验研究等进行了简述,对点火性能影响因素、点火性能改善方案进行了总结,以期为后期燃烧室点火设计提供参考。

2 燃烧室点火研究基本概况

通过收集、整理、分析多篇国内外大学、研究中心、企业以及行业设计所等有关燃烧室点火研究的文献^[1-36],发现有以下几个特点:

(1) 借助先进的测量仪器,逐步加深对点火过程的认识,深入观察了火核发展、火焰传播、火焰稳定及联焰过程;在推导半经验关系式时,考虑的影响因素越发全面。同时,更加关注经验关系式的普适性与准确性,以求超出理论研究,成功应用于工程设计;不断优化改进数值模拟技术、点火模型,以提高产品设计效率,降低设计成本。

(2) 国外研究早于国内研究,且所涉领域极为全面,推导的经验与半经验关系式至今仍对设计工作起着指导与参考作用;对数值模拟的研究较为深入,从反应模型到自编程软件一步步细化,同时多次调试计算模型,并与试验数据进行了定性验证对比。国内自2007年才开始点火研究,起步较晚。目前,国内外研究的内容均相似,主要关注点火半经验公式提出、关键参数预测、全环点火过程观测等,并在研究中辅以高速摄像、粒子图像测速系统(PIV)、相位多普勒粒子分析仪(PDPA)等测试手段。

(3) 目前仍多是通过试验手段完成观测分析、验证校核、雾化初始参数提供;数值模拟(定性、定量)方面,包括初始输入参数、湍流模型、燃烧模型、点火模型、化学反应模型和两相流模型,仍有较大的发展空间。

(4) 早期点火研究关注的是“点”,而现在关注的是“面”,主要偏向于联焰、火核分裂、火焰结构等方面的研究,且多为结构或位置参数的规律性探讨,而此部分对燃烧室影响较大,对推动燃烧室设计科学发展具有积极作用。

3 点火研究内容

航空发动机起动过程中燃烧室能否稳定、快速地点着火,直接决定着发动机能否成功起动。燃烧室点火过程为典型的强迫点火过程,肖为等^[1]对电

火花点火的火核衍化过程进行了详细描述,给出了点火成功瞬态图像(图1)。Mastorakos^[2]、杨金虎等^[3]将环形燃烧室点火过程划分为4个阶段:①火核生成阶段;②火焰传播阶段;③火焰稳定阶段;④全环联焰阶段。本文将从点火特性预测方法、数值模拟以及试验研究3个方面进行概述。

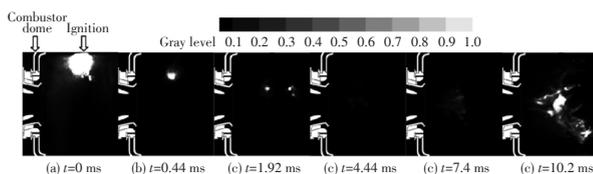


图1 点火成功瞬态图像^[1]

Fig.1 Successful ignition sequence

3.1 点火特性预测方法

燃烧室点火特性预测方法可分为两类。一是基于特征时间的点火特征经验预测(特征时间分析+试验标定)^[4-5]。该方法主要关注初始火核形成和点火延迟现象,对后续联焰过程无考虑,且由于经验常数的确定与燃烧室结构形状相关,其普适性有待考量。此外,点火延迟现象极难通过CFD模拟观察或复刻。二是基于数值模拟和火核追踪的点火概率预测(数值模拟+理论分析)^[6]。该方法可利用冷态流场结构,对点火概率空间分布、点火时间尺度以及点火的4个阶段进行分析,但对计算网格的依赖较强(网格尺寸需适当),无法准确计算火焰体积和火焰膨胀过程,对旋流雾化喷嘴的预测精度仍待检验。

3.2 数值模拟

目前,航空发动机点火过程数值模拟主要基于大涡模拟(LES)展开,也有将雷诺应力模型(RANS)耦合到LES中尝试提高计算效率。大涡模拟在火花点火后的火焰传播计算中较为精确,能准确捕获点燃和回火工况下的火焰运动,对结构和非结构网格都适用。

Boileau等^[7]运用非定常大涡模拟对直升机发动机18个头部的环形燃烧室的点火过程进行了模拟。Jones等^[8]采用欧拉随机轨道滤波概率密度函数的大涡模拟方法对单头部燃烧室点火进行了模拟,结果表明火花尺寸是影响燃烧室内煤油点火性能的关键参数,且此结果与相似几何结构下的高速成像试验结果定性一致。吕浩杰^[9]采用LES捕捉实时流场的脉动、火焰传播细节和非稳态点火过程,采用了能反映点火过程湍流-化学反应相互作用的EDC燃烧模型,电火花点火模拟选择Fluent自带的电火花

模型,火花设置为球形、尺寸固定且不随时间变化。Steil等^[10]对航空煤油及其替代燃料的点火延迟时间进行了研究,指出DAG化学反应模型比BBS化学反应模型的预测结果更接近试验结果,且反应温度对点火延迟时间影响显著。Antoshkiv等^[11]点明点火性能与喷雾形状及其雾锥的随机性密切相关,气流速度场、喷雾质量流量和雾化质量是影响雾化过程的关键因素。Rao等^[12]指出,在最小点火能-常温常压点火时,可暂不考虑最小点火能对火核生成过程的影响,混合物处于可燃极限范围内时电火花的能量便足以将其点燃;但对于高空点火,最小点火能的影响较大,建立点火预测模型时需考虑其影响。马佳敏等^[13]采用压力进出口边界条件、VOF两相流模型、Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对旋流雾化喷嘴的雾化特性进行数值模拟,模拟结果与试验结果的误差为0.45%,但此方法的燃油雾化流量预测值与试验数据偏差较大(约为8.49%)。

数值模拟时采用不同的模型得到的结论有差异。研究发现,相较于输运PDF模型和条件矩模型,火焰面模型和动态增厚火焰模型在实际燃烧室点火计算中具有明显优势。其原因是这两种模型的计算量较小,计算精度满足工程需要。此外,动态增厚火焰模型能捕捉点火过程中火焰的动态扩散,可通过增厚火焰前锋厚度达到大涡求解尺度并保持火焰传播速度不变来提高点火大涡模拟的计算准确度。

综合考虑计算精度以及运算速度,相较于直接数值模拟和雷诺应力模型数值模拟,大涡模拟具有一定优势,且模型朝着更符合实际的煤油蒸发和化学反应模型、燃烧室内流动(包括旋流结构、气膜冷却等)、出流条件影响等方向改进。

3.3 试验研究

运用试验的手段对燃烧室点火进行研究,一是通过对试验数据的分析、拟合,得到或修正各种预测模型中的各类经验常数;二是运用高速摄影技术等现代化记录手段描述燃烧室点火过程的细节,特别是火焰传播的路径;三是通过试验的手段研究不同因素对燃烧室点火性能的影响。

赵明龙等^[14]开展了单头部、扇形、全环点火试验和油雾粒径测量试验(采用相位多普勒粒子分析仪),得到了Lefebvre燃烧室点火经验公式。林宇震等^[15]仅使用副油路(单油路离心喷嘴)点火,在常温常压下开展了单头部矩形燃烧室的点火性能试验,并根据试验所得数据对Jasuja关系式的系数进行了修

正,得到了无雾化空气时的燃油索太尔平均直径(SMD)预测方程。王延胜等^[16]开展了单环腔中心分级燃烧室的常温常压和常温低压点火试验,预估了燃烧室贫油点火边界的燃油SMD,并指出影响燃烧室性能的主要参数是空气总压、空气压降、空气流量和燃油SMD。黄兵等^[17]对中心分级燃烧室变频变能点火性能进行了试验研究,得出点火能量较点火频率对点火性能的影响更为显著,燃烧室进口空气流量和主燃区容积主要影响燃烧室参考速度,并结合Lefebvre和王延胜点火模型^[16],拟合得到离心喷嘴经验关系式。

随着高速摄影等技术的发展,燃烧室点火试验观测手段逐渐丰富。Read等^[18]利用高速摄像技术、平面激光诱导荧光(PLIF)技术,描述了贫油直喷燃烧室高空再点火时火焰的形成和稳定过程,并提出了一种可实现火核追踪的图像处理技术。Marchione等^[19]借助PDPA、高速摄影技术,分析了液滴速度场、液滴粒径和总当量比(包括燃油液滴和燃油蒸气)对燃烧室点火性能的影响,指出点火成功率与向雾化喷嘴传播的火焰单元有关。Denton^[20]对富油燃烧-猝熄-贫油燃烧燃烧室进行了高空点火试验,借助高速摄像讨论了压降、环境压力和环境温度对点火性能的影响,发现火核尺寸对点火性能影响较小,而火核的发展与气流平均速度场密切相关。Dong等^[21]通过试验方法观测了点火火核的时-空演变。

为研究不同因素对燃烧室点火性能的影响,通常采取试验的手段进行探索。付镇柏等^[22]采用RP-3航空煤油,在高空负压工况下对不同台阶高度单头部矩形试验件的点火性能进行了研究。代威等^[23]测量了装配不同旋流器的单头部扇形燃烧室的点熄火性能。薛鑫等^[24]分析了火焰筒压力损失为2.0%、2.5%、3.0%时对双旋流轴向旋流器的矩形三头部燃烧室点火边界的影响。林震宇等^[25-27]研究了旋流器气量分配、结构变化、旋流数等对燃烧室点火性能的影响。

通过众多燃烧室点火试验研究,得出了一些规律性的结论。如火花位置影响火核的早期发展,当火花位于回流区下游时,由于此处的燃油混合分数适宜且气流湍流强度较低,火核不会立即熄灭;但此处的平均轴向速度较高,而火核需逆流向上游传递,点火难度较高等。尽管目前已开展了大量的点火试验研究,但其也存在以下局限性,一是试验得出的经验常数通用性较差,对模型结构及工况范围的限制

较为严格;二是试验时测量手段有限,只是从宏观角度观察和利用试验数据分析点火特性,未能深入机理进行分析;三是试验件加工水平参差不齐,试验成本较高。

4 点火性能影响因素及改善方案

根据上述众多研究结果,总结了影响燃烧室点火性能的几个主要因素:①点火器位置;②电火花能量;③点火频率;④点火器附近燃油的浓度、粒径和局部流场拉伸、热扩散;⑤火焰传播路径及火焰根部区域的燃油浓度、粒径和局部流场拉伸、热扩散;⑥火焰需满足向上游传递的流动条件;⑦燃烧室进口温度;⑧燃烧室进口压力;⑨主燃区流场结构(主回流区尺寸)等。在开展燃烧室相关设计时需重点关注这些因素。

根据影响燃烧室点火性能的主要影响因素,归纳出以下几个燃烧室点火性能改善方案:①增加进气量——有助于改善燃油雾化质量,从而提升点火性能;②提高进口压力——进口温度和流速一定时可降低点火油气比,提升点火性能;③提高燃油温度——有助于提升燃烧室点火性能;④提高喷嘴雾化性能——是提升点火性能的有效途径。

5 结束语

综合分析了多篇国内外点火研究文献,对现有燃烧室点火研究成果进行了概述,总结了影响点火性能的主要因素,提出了改善点火性能的多个思路,后续点火研究可朝着以下几个方面进行深入探讨:

(1) 在现有计算能力上,可将RANS的模拟结果与试验数据相结合,开发一种基于试验数据的RANS模拟方法。

(2) 随着计算能力的提高,在大涡数值模拟方法基础上,进一步补充机理性研究试验(包括流场试验、油雾场试验、点火延迟试验等),细化计算模型与计算方法,提高计算准确性。

(3) 归纳总结已有的各种参数及模型对点火性能的影响,开发可预测发动机全包线点火边界的工程设计方法。

参考文献:

[1] 肖为,江立军,陈盛.燃烧室电火花点火模型[J].航空动力学报,2021,36(1):25—33.

- [2] Mastorakos E. Forced ignition of turbulent spray flames[J]. Proceedings of the combustion institute, 2017, 36(2): 2367—2383.
- [3] 杨金虎.多级旋流分级燃烧室点火/熄火特性、机理和预测方法研究[D].北京:中国科学院大学,2020.
- [4] Peter J E, Mellor A M. A spark ignition model for liquid fuel sprays applied to gas turbine engines[J]. Journal of energy, 1982, 6(4): 272—274.
- [5] Peter J E, Mellor A M. Characteristic time ignition model extended to an annular gas turbine combustor[J]. Journal of energy, 1982, 6(6): 439—441.
- [6] Neophytou A, Richardson E S, Mastorakos E. Spark ignition of turbulent recirculating non-premixed gas and spray flames: a model for predicting ignition probability[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(4): 1503—1522.
- [7] Boileau M, Staffelbach G, Cuenot B, et al. LES of an ignition sequence in a gas turbine engine[J]. Combustion and flame, 2008, 154(1-2): 2—22.
- [8] Jones W P, Tylliszczak A. Large eddy simulation of spark ignition in a gas turbine combustor[J]. Flow turbulence and Combust, 2010, 85(3-4): 711—734.
- [9] 吕浩杰.点火方案对燃烧室点火性能的影响研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- [10] Steil U, Braun-Unkhoff M, Aigner M. An experimental and modeling study on the auto ignition of kerosene and surrogate fuel mixture[R]. AIAA 2008-0973, 2008.
- [11] Antoshkiv O, Berg H P. Spray phenomena and their influence on the ignition performance of a model aeroengine combustor[R]. ILASS08-11-1, 2018.
- [12] Rao H N, Lefebvre A H. Minimum ignition energies in flowing kerosene-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 1976, 27(1): 1—20.
- [13] 马佳敏,王博韬,李胡坤,等.旋流雾化喷嘴雾化特性的数值模拟[J].航空发动机,2019,45(5):53—57.
- [14] 赵明龙,杨志民,林宇震,等.单头部/扇形/全环燃烧室贫油点火性能换算[J].航空动力学报,2017,32(8): 1822—1826.
- [15] 林宇震,林培华,徐全宏,等.复合式收扩套筒空气雾化喷嘴燃烧室点火研究[J].航空动力学报,2007,22(3): 342—346.
- [16] 王延胜,林宇震,李林,等.中心分级燃烧室点火性能试验研究[J].推进技术,2016,37(1):98—104.
- [17] 黄兵,邱伟,房人麟,等.中心分级燃烧室变频变能点火性能试验[J].航空动力学报,2019,34(3):529—538.
- [18] Read R W, Rogerson J W, Hochgreb S. Flame imaging of gas turbine relight[J]. AIAA Journal, 2010, 48(9): 1919—1927.

- [19] Marchione T, Ahmed S F, Mastorakos E. Ignition of turbulent swirling n-heptane spray flames using single and multiple sparks[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(1): 166—180.
- [20] Denton M. Experimental investigation into the high altitude relight characteristics of a three-cup combustor sector [D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2017.
- [21] Dong R, Lei Q, Zhang Q, et al. Dynamics of ignition kernel in a liquid-fueled gas turbine model combustor studied via time-resolved 3D measurements[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 232: 111566.
- [22] 付镇柏, 林宇震, 傅奇慧, 等. 不同台阶高度对中心分级燃烧室点火性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(5): 1062—1070.
- [23] 代威, 林宇震, 张驰. 第2级径向旋流器旋流数对燃烧室点火和贫油熄火性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(5): 1092—1098.
- [24] 薛鑫, 林宇震, 张驰, 等. 火焰筒压力损失对点火特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(10): 2229—2235.
- [25] 代威, 林宇震, 徐全宏, 等. 径向旋流器气量分配对点火熄火特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(3): 608—615.
- [26] 康尧, 林宇震, 霍伟业, 等. 双级旋流杯结构变化对点火特性的影响研究[J]. *推进技术*, 2014, 35(5): 675—680.
- [27] 刘桂桂, 林宇震, 胡好生, 等. 旋流杯一级旋流数变化对点火性能的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(6): 1117—1121.
- [28] 王成军. 燃气轮机燃烧室喷雾燃烧的数值研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [29] Neophytou A, Mastorakos E. Simulation of laminar flame propagation in droplet mists[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156: 1627—1640.
- [30] Neophytou A, Mastorakos E, Cant R S. Complex chemistry simulations of spark ignition in turbulent sprays[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2135—2142.
- [31] Mongia H. Engineering aspects of complex gas turbine combustion mixers part I: High ΔT [R]. AIAA 2011-107, 2011.
- [32] 杨金虎, 刘存喜, 刘富强, 等. 分级燃烧室预燃级旋流组织对点熄火性能影响的试验研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(9): 2050—2059.
- [33] Wang X F. Effects of primary jet position on combustor aerodynamic characteristics and ignition/LBO performance [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(9): 2020—2028.
- [34] Liu C, Liu F, Yang J, et al. Experimental investigation of spray and combustion performances of a fuel-staged low emission combustor: part I effects of main swirl angle[R]. ASME GT2016-56530, 2016.
- [35] 冯剑寒, 郎旭东, 金武, 等. 三头部燃烧室点火过程中火焰传播特性研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2021, 53(1): 150—157.
- [36] Gao W, Yang J, Mu Y, et al. Experimental investigation on spark ignition of a staged partially premixed annular combustor[J]. *Fuel*, 2021, 302: 121062.

(上接第46页)

参考文献:

- [1] 向锦武, 阚梓, 邵浩原, 等. 长航时无人机关键技术研究进展[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(6): 57—77.
- [2] 段海滨, 范彦铭, 张雷. 高空长航时无人机技术发展新思路[J]. *智能系统学报*, 2012, 7(3): 195—199.
- [3] 胡晓煜. 国外高空长航时无人机动力技术的发展[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2006, 19(4): 56—60.
- [4] 王进, 骆广琦, 陶增元, 等. 雷诺数对压气机特性及发动机稳定性影响的计算和分析[J]. *航空动力学报*, 2003, 18(1): 20—23.
- [5] 王琴芳. 航空燃气涡轮发动机原理[M]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
- [6] 钟玲玲. 临近空间低动态涡扇动力飞行器应用发展研究[J]. *现代防御技术*, 2018, 46(4): 8—13.
- [7] Clause J H. Global Hawk system and payload[C]// *Unmanned Vehicles Conference*. San Diego: 1999.
- [8] 《世界中小型航空发动机手册》编委会. 世界中小型航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
- [9] United States Department of Defense. Unmanned aerial vehicle(UAV) roadmap 2005-2030[R]. U.S.: Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [10] United States Department of Defense. Unmanned systems roadmap FY2007-2032[R]. U.S.: United States Department of Defense, 2007.
- [11] 方昌德. 世界航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.
- [12] 王鹏飞, 刘玉芳, 郭文, 等. 高转速对直通型篦齿封严特性影响的试验研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2007, 20(2): 45—48.