

富油-淬熄-贫油低排放燃烧技术发展

王梅娟¹ 赵 硕¹ 杨 浩¹ 姜宇涵²

1. 中国航发湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002

2. 北京航空航天大学 北京 100191

摘要: 富油-淬熄-贫油 (RQL) 燃烧技术是典型的低排放燃烧技术。富油-淬熄-贫油燃烧技术具有燃烧效率高, 氮氧化无排放低的技术特点和优势, 能够实现宽工况范围内的燃烧稳定性, 具有很高的安全性和可靠性。本文从RQL燃烧技术的概念原理以及国内外研究动态进行探讨, 旨在探寻实现RQL燃烧技术的关键技术难点, 明确RQL燃烧技术重点突破方向, 促进RQL燃烧技术的进一步发展。

关键词: 低排放; 燃烧; RQL; 氮氧化物

引言

典型民用航空发动机低排放技术主要分为三类, 分别是贫油预混预蒸发 (LPP) 燃烧技术, 贫油直喷 (LDI) 技术和富油-淬熄-贫油 (RQL) 技术^[1,2]。LPP燃烧技术能够达到高燃烧效率, 同时有效降低氮氧化物和碳烟的排放水平, 但是LPP燃烧技术存在回火、自燃及燃烧不稳定性等问题。LDI低排放燃烧技术同样具有降低NO_x排放的巨大潜力, 但是在小工况状态下, LDI燃烧室头部当量比低, 容易导致熄火, 并且头部多个喷嘴的结构设计和控制难度大, LDI低排放燃烧技术成熟度相对LPP技术较低。RQL低排放燃烧技术具有燃烧效率高以及点熄火性能好的特点, 同时不易出现回火和自燃, 其降低NO_x排放水平与富燃区油气混合以及富燃区的快速淬熄密切相关。RQL燃烧技术在宽工况范围内燃烧性能稳定, 具有较好地安全性和可靠性, 故在民用航空领域, RQL燃烧技术成为了辅助动力装置燃烧室首选的低排放燃烧技术。

1 RQL 低排放燃烧技术原理

RQL低排放燃烧技术需要先先在燃烧室内部形成燃烧均匀的富燃区, 富燃区当量比范围在1.4-1.8, 富燃区燃烧后形成的产物通过淬熄空气快速进入贫燃区, 将富燃区当量比降快速降低至0.7以下, 减少在当量比1附近燃烧反应时间, 降低NO_x生成, 图1中显示了RQL燃烧室不同淬熄路径。

典型的RQL低排放燃烧室分为3个燃烧区, 沿流向分别是富燃区、快速淬熄区和贫燃区。富燃区中当量比范围在1.4-1.8范围内, 在这个当量比范围内, 富燃区内燃烧稳定性好, 燃烧效率高, 碳烟生成量也在接受范围内, 并且燃烧室点熄火边界更宽。此外, 在这个当量比范围内, 富燃区火焰温度控制在1900K以下, 同时氧气含量相

对较少, 能够有效降低热力型氮氧化物的生成。

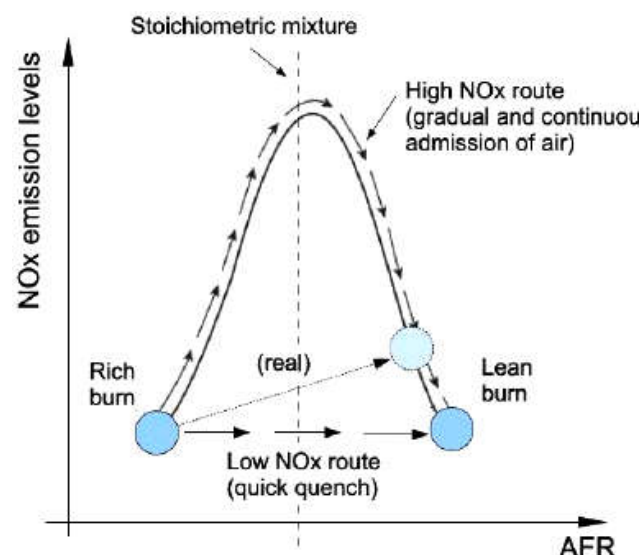


图1 RQL燃烧方式原理图

富燃区当量比高于1, 燃烧所需空气不足, 富燃区的燃料不能完成反应, 燃烧产物中包含大量未燃碳氢及一氧化碳等产物。因此需要在富燃区出口处加入补燃空气, 富燃区燃烧产物进一步发生燃烧反应, 实现充分燃烧。传统补燃空气加入路径较为缓慢, 导致从富燃区到贫燃区中间有明显补燃区, 在化学恰当比附近的燃烧反应驻留时间偏长, 火焰温度偏高, 热力型氮氧化物生成量较高。RQL低排放燃烧及技术通过快速淬熄路径, 实现富燃区到贫燃区快速过渡, 减少高温反应区容积和时间, 从而降低氮氧化物的生成。在淬熄区下游是贫燃区, 贫燃区的当量比低, 火焰温度较低, 热力型氮氧化物生成少, 通过掺混气流对燃烧室出口温度进行进一步调整。

2 RQL 燃烧技术国内外研究现状

美国GE公司的Tech Insertion航空发动机应用了RQL

低排放燃烧室^[3,4]。该RQL低排放燃烧室对火焰筒淬熄掺混结构进行了优化，具体技术措施包括：淬熄气量分配、淬熄孔分布和几何形状，此外燃通过先进的火焰筒冷却技术，控制火焰筒壁面处燃气温度，最终达到较低的NO_x排放水平。美国普惠公司在RQL低排放燃烧技术上开展了一系列研制工作，其研制的TALON系列RQL低排放燃烧室已成功应用在民用航空发动机上^[5]。普惠公司的TALON X燃烧室，采用RQL燃烧技术，其燃烧室氮氧化物排放值比ICAO的CEAP/6标准低60%。此外，TALON X燃烧室具有燃烧效率高、燃烧稳定好等优点。

N.K.Rizk等人采用NO_x生成模型研究了燃烧室结构对氮氧化物生成的影响^[6]。该研究发现燃烧室氮氧化物生成量与燃烧区的当量比、停留时间以及燃烧室压力和温度等参数密切相关。

美国GE公司研制了工业燃机用RQL低排放燃烧室，如图2中所示，该RQL低排放燃烧室能够使用低热值（LHV）燃料进行工作^[7]。该RQL低排放燃烧室可实现50ppm的氮氧化物排放水平，比常规燃烧室氮氧化物排放水平低3%，并且对燃料中氨的含量不敏感，具有较好的燃料适应性。

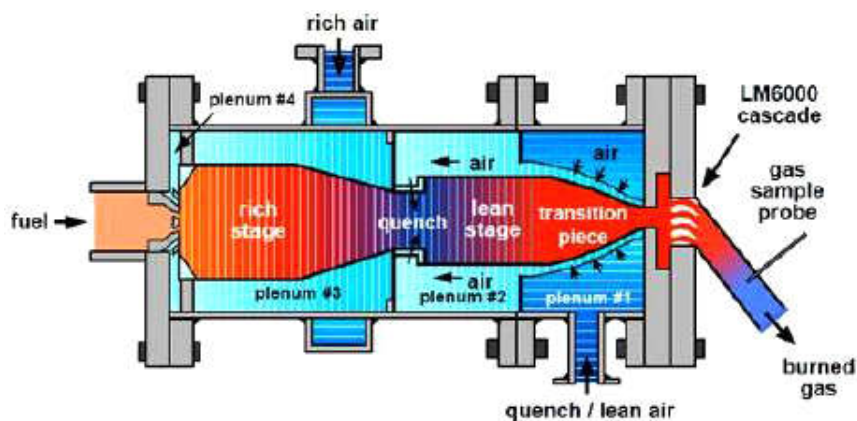


图2 GE公司RQL燃烧室简图

J.Koopman等人对不同掺混结构的RQL低排放燃烧室进行对比研究，研究淬熄孔的排布对淬熄掺混的影响。其试验结果发现淬熄孔排布能够显著降低热力型NO的生成量。Holdema等人针对RQL低排放燃烧室中的淬熄掺混效果和排放物生成开展研究。研究中试验结果发现淬熄射流孔的数目对淬熄掺混效果影响很大，但是对燃烧室NO_x的生成总量影响较小。同时试验中发现NO_x生成量最高区域位于燃烧室射流孔附近的近火焰筒壁面区域。研究还发现单独增加射流空气温度对NO_x的生成影响不大，但是同时增加主流区及射流区温度会导致NO_x生成量明显增加。

国内学者对RQL低排放燃烧技术也开展了广泛研究工作。北航樊未军等人^[8]通过试验验证了RQL驻涡燃烧室具备降低氮氧化物和一氧化碳排放水平的潜力。蒋波等人^[9]同样开展了RQL驻涡燃烧室排放试验研究工作。吉雍彬等人^[10]对RQL模型燃烧室开展了燃烧特性研究工作，试验中采用气态甲烷作为燃料，对RQL模型燃烧室的轴向组分浓度和温度分布进行测试，对RQL模型燃烧室的出口温度分布及排放进行测试。该研究中考察了淬熄空气比例及富燃区当量比对RQL燃烧室的燃烧特性和排放特性影响规律。虞江鹏等人也对三头部RQL燃烧室开展

了流场特性的研究，对比了淬熄射流动量通量比和主流雷诺数对燃烧室头部流场及回流区的影响。陈坚等人针对RQL低排放燃烧室模型试验件开展试验研究工作，获取不同主燃孔结构参数对RQL低排放燃烧室的组分和火焰结构的影响。

结论

RQL低排放燃烧技术具有贫油点熄火边界宽、燃烧效率高、回火自燃风险低以及燃烧稳定性好等优点。采用RQL低排放燃烧技术的燃烧室能够满足航空发动机和地面燃气轮机对燃烧性能和排放指标的要求。根据RQL低排放燃烧技术的特性，需要解决以下两个关键技术问题：

1) 富燃区的火焰筒壁面冷却技术难点。由于富燃区的局部温度超过1800K，火焰筒壁面需要冷却，但是冷却方式不能采用常规气膜冷却。这是由于气膜空气进入富燃区会与燃气掺混，进而出现局部当量比在1附近区域，进而产生大量氮氧化物。

2) 快速掺混技术难点。这里主要包含两个方面，一是如何设计空气雾化喷嘴使得在富油燃烧区，燃油和空气能够快速均匀混合，保证稳定高效的燃烧；二是如何优化淬熄射流孔气量比例和排布，实现淬熄空气与富燃区燃烧产物的快速均匀混合，有效降低氮氧化物生成。

参考文献

- [1]赵坚行.民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J].航空动力学报,2008(06):986-996.
- [2]袁用文.富油/淬熄/贫油(RQL)燃烧室性能和排放的实验研究[D].上海:上海交通大学,2015.
- [3]Mongia H C. Engineering aspects of complex gas turbine combustion mixers Part IV: swirl cup [C] . 9th Annual International Energy Conversion Engineering Conference, 2011.
- [4]Schweitzer J K, Anderson J S, Scheugenpflug H, et al. Validation of propulsion technologies and new engine concepts in a joint technology demonstrator program [C] . International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE), 2005.
- [5]McKinney R G, Sepulveda D, Sowa W, et al. The Pratt&Whitney TALON X low emissions combustor: revolutionary results with evolutionary technology [C] . 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007.
- [6]Rizk N K, Mongia H C. Low NO_x rich-lean combustion concept application [C] . 27th Joint Propulsion Conference, 1999.
- [7]Feitelberg A S, Lacey M A. The GE rich-quench-lean gas turbine combustor [J], Journal of Engineering for Gas Turbines Power, 1998, 120(3): 502-508.
- [8]樊未军,严明,易琪,等.富油/快速淬熄/贫油驻涡燃烧室低NO_x排放[J].推进技术,2006,27(1):88-91.
- [9]蒋波,何小民,金义,等.采用钝体式孔板淬熄的富油-淬熄-贫油驻涡燃烧室排放性能试验研究[J].推进技术, 2016,37(4):675-683.
- [10]吉雍彬,葛冰,毛荣海,等.富油/淬熄/贫油(RQL)燃烧室燃烧和排放特性的实验研究[J].推进技术,2017,38(06): 1335-1342.