

涡旋燃烧

曾卓雄 徐义华 著

WOXUAN RANSHAO



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

涡旋燃烧

曾卓雄 徐义华 著

WOXUAN RANSHAO

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要涉及涡旋燃烧的相关研究,以驻涡燃烧室为研究主体,对模型结构、压力损失、火焰特性、燃烧效率等进行了研究分析,并对衍生的燃烧室结构进行了相关分析。内容包括中心钝体式驻涡燃烧、含导流片式驻涡燃烧、旋流驻涡燃烧、多凹腔驻涡燃烧、涡旋冷壁燃烧及可控涡燃烧。

本书可作为航空、航天、石油、化工、冶金、能源等领域的高校教师、研究生和相关科研人员科研、教学和学习的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

涡旋燃烧/曾卓雄,徐义华著. —北京:中国电力出版社,2017.8

ISBN 978-7-5198-0866-2

I. ①涡… II. ①曾… ②徐… III. ①涡-环形燃烧室 IV. ①TK175

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 147471 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:徐 超 (010-63412386)

责任校对:太兴华

装帧设计:郝晓燕

责任印制:蔺义舟

印 刷:航远印刷有限公司

版 次:2017 年 8 月第一版

印 次:2017 年 8 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:13.25

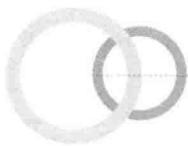
字 数:312 千字

印 数:0001—1000 册

定 价:58.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



前言

随着世界各国能源紧缺和对环保要求的不断提高,燃烧室的发展趋势和发展重点在于如何有效兼顾高效燃烧和低排放性能。目前国内外发展了一批低排放燃烧技术,研制了多种低污染燃烧室,如驻涡燃烧室(TVC)、富油-淬熄-贫油(RQL)燃烧室、贫油直接喷射(LDI)燃烧室和贫油预混预蒸发(LPP)燃烧室等。这些低污染、低排放燃烧技术的发展水平不同,有的已经得到一定的实际应用,有的还处于基础研究阶段。

从目前研究结果来看,采用某种结构形成回流区以延长停留时间并利用回流区低速高温的特点来稳定燃烧的思路正广泛地被各国研究人员应用于新的研究开发中。

根据产生回流区的机制不同,传统的火焰稳定技术主要有突扩火焰稳定和旋流火焰稳定等,但它们存在油气混合不充分、稳定工作范围窄等问题。在凹腔减阻研究的基础上出现的驻涡燃烧室(TVC: Trapped Vortex Combustor),由于其具有压力损失小、驻涡火焰稳定、燃烧效率高等特点而得到了广泛的关注。但这是一种单涡结构,单涡结构的 TVC 能够在腔内形成稳定的驻涡,也能够为主流提供热源,起到稳焰的作用,但却很难实现腔内高温燃气与主流的快速均匀掺混。为此出现了双涡结构的 TVC,其特点是:混合气由前壁面底部喷入,而后壁面的空气入射喷孔则位于壁面中间位置,这样就在凹腔中就形成了两个驻涡,底部的大涡起到提供稳定热源的作用,而上部的二次涡则可以起到促使主流与腔内高温燃气掺混的中介作用。但是如何确定凹腔内燃气混合物与空气的喷射位置以及前后壁面上的喷孔位置就非常关键。凹腔燃料混合物与空气不同的喷射位置及不同的喷射工况都会引起凹腔内涡形的改变,甚至会引起凹腔驻涡形式由双涡结构变成单涡结构。但旋涡燃烧室是一种性能优越和极具发展前景的新型燃烧系统,对它们的研究越来越受到重视。

本书作者多年来一直从事旋涡燃烧室方面的研究,有一定积累。另外,有感于系统阐述旋涡燃烧室的书籍很少,故此萌发了将多年来的相关研究成果整理出版的想法。本书出版得到国家自然科学基金(51666012)资助。

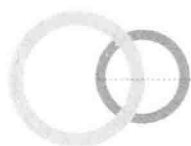
感谢西北工业大学孙海俊、上海交通大学李凯、中航工业 608 所王志凯、中航工业 602 所徐舟、北京动力机械研究所田佳莹、中国人民解放军 5713 厂张龙、中国人民解放军北海舰队陈超杰、薛锋等,正是他们的工作使本书的内容丰富了很多。

由于作者水平和能力有限,书中如有疏漏之处,恳请广大同行和读者在阅读本书后提出批评和宝贵意见。

曾卓雄(上海电力学院)

徐义华(南昌航空大学)

2017 年 4 月

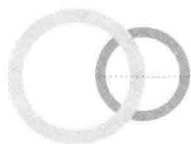


目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 研究背景	1
第二节 驻涡燃烧室特点	2
第三节 国内外研究现状	3
参考文献	9
第二章 中心钝体式驻涡燃烧	12
第一节 中心钝体式驻涡燃烧室冷态流动	12
第二节 横向射流对燃烧室流场的影响	17
第三节 后钝体开口 AVC 燃烧流场结构	24
第四节 基于涡流发生器射流原理的 AVC 燃烧特性	33
第五节 AVC 流动传热的场协同分析	42
参考文献	57
第三章 含导流片式驻涡燃烧	59
第一节 有无钝体驻涡燃烧室的性能比较	59
第二节 有钝体燃烧室的结构优化	75
第三节 工况变化对燃烧室燃烧流动的影响	84
第四节 带导流片的 AVC 燃烧特性研究	95
参考文献	102
第四章 旋流驻涡燃烧	104
第一节 燃烧室主要结构参数的影响	104
第二节 燃烧室湍流流场特性的分析	118
第三节 工况变化对燃烧流动的影响	128
参考文献	136
第五章 多凹腔驻涡燃烧	137
第一节 双圆盘钝体 AVC 冷态流动	137
第二节 三圆盘钝体 AVC 冷态流动	142
第三节 三圆盘钝体 AVC 湍流燃烧流动	149
参考文献	163

第六章 涡旋冷壁燃烧.....	164
第一节 旋流冷壁燃烧室的结构优化.....	164
第二节 中心空气射流对旋流冷壁燃烧室燃烧流动的影响.....	174
第三节 喷管结构对旋流冷壁燃烧室燃烧流动的影响.....	179
参考文献.....	187
第七章 可控涡燃烧.....	189
第一节 结构参数优化对可控涡扩压器性能的影响分析.....	189
第二节 轴向引气口位置及进口条件对可控涡扩压器流场的影响分析.....	194
第三节 可控涡结构的三维湍流燃烧特性的数值分析.....	198
参考文献.....	204



第一章 概 论

第一节 研究 背 景

在现代高性能燃气轮机的设计过程中,高温升和低污染是燃气轮机燃烧室技术水平高和工作能力强的重要指标。高温升是指通过提高主燃烧室的温升能力,以提升主燃烧室的出口温度;低污染要求通过主燃烧室的分级供油、分区燃烧获得燃气轮机较低的污染物排放。高温升、低污染燃烧室已成为现代先进燃气轮机主燃烧室研究的主要方向,关键技术之一是燃烧组织技术。先进的燃烧组织方式是保证主燃烧室性能全面满足综合设计要求的^[1]。

近些年发展的典型低排放燃烧技术包括分级燃烧、贫油预混预蒸发(LPP)、贫油多点喷射(LDI)和富油-淬熄-贫油(RQL)等技术。

(1) 分级燃烧技术可以实现在燃气轮机不同功率时,控制燃烧温度和驻留时间,从而保证在全功率范围内优良的燃烧性能和排放性能。但其存在的主要问题是结构复杂,在不同状态过渡时排放物都会有不同程度的增加。

(2) LPP 技术可以在燃气轮机全工况范围内,在保证极高的燃烧效率的同时,把燃烧温度控制在较低的程度,从而抑制 NO_x 的生成。其存在的主要问题是冷启动困难、容易产生回火且稳定性较差。

(3) LDI 是为解决 LPP 的回火和稳定性问题而研发的,主要的技术措施是把现有的单个喷嘴改换成 10~20 个喷嘴,每一个喷嘴的燃油流量很小,加上多点供入,可以大大减少雾化平均粒径和改善油气混合质量,同时通过控制每一个喷嘴的供入,可以保证燃气轮机全功率状态下的燃烧和排放性能。但其存在的主要问题是结构复杂、重量大幅度增加、控制难度大、可靠性也变差。

(4) RQL 技术通过合理地布置油气,首先进行富油燃烧,接着与新鲜空气快速掺混淬熄并混合成贫油可燃气,控制燃烧温度,这种方式可以实现燃烧性能和低排放性能的良好统一。但其存在的主要问题是:

1) 由于冷却气的存在,使主燃区一些区域的油气比接近恰当比,从而偏离了原先的富油设计;

2) 在中间区很难保证快速充分混合,而造成燃烧效率下降^[2]。

总之上述几种低排放燃烧技术各有其特点和优劣。各公司和研究中心在上述技术基础上研制了多种类型的燃烧室,为当前低排放燃烧室的研制奠定了良好的技术基础。在充分了解低排放燃烧技术的基础上,国际上主要发动机公司发展了多型低排放燃烧室。20 世纪 80 年代,通用电气航空发动机公司(GEAE)基于分级燃烧的概念,研制了径向分级燃烧室,目前已用于 CFM56-7B、GE90-94 等发动机上;20 世纪 90 年代以来,国际发动机公司(CFM)又在分级燃烧室基础上,结合 LPP 燃烧技术发展了双环腔预混燃烧室(TAPS),计划用在 GENx 和



Leap56 发动机上, 前期验证结果表明, NO_x 、CO 和 uHC (碳氢) 排放量仅为 CAEP2 标准的 45%、30% 和 5%。此外, 美国国家航空航天局 (NASA) 的 Glenn 研究中心和罗尔斯·罗伊斯公司先后发展了贫油预混燃烧技术 (LDM), 其扇形燃烧室模型试验表明发动机小功率工作时排放较低。罗尔斯·罗伊斯公司采用 LDM 技术发展了单环腔分级燃烧室, 预计将其用于遑达 1000 发动机中。目前国际上主要发动机公司研制的航空发动机的 NO_x 排放的最好水平已经达到 CAEP6 标准 (考虑总压比为 35、排放工作裕度为 20%), 但离预计的 2020 年的目标 (CAEP2 标准排放量的 20%) 还有较大的差距, 因此需要发展更先进的低排放燃烧技术^[3]。

第二节 驻涡燃烧室特点

驻涡燃烧室 (TVC) 是为适应下一代高推重比燃气轮机的发展, 作为一种典型的高温升、高热容燃烧室而开发设计的。美国是第一个提出 TVC 概念的国家, 对 TVC 技术的研究最早、成果也最多。经过数十年的发展, TVC 技术的原理日渐趋于明朗, 性能也逐步被挖掘发现, 并在实际中得到越来越广泛的应用。总之, 驻涡燃烧室是一种性能优越和极具发展前景的新型燃烧系统, 也适合应用和发展各种低排放燃烧技术。

驻涡燃烧室的概念于 1995 年提出, 如图 1-1 所示。与常规旋流器燃烧室 (见图 1-2) 相比, TVC 采用了不同的燃烧组织方式, 即分级供油、分区燃烧^[5-8]。TVC 主要由两部分组成, 即驻涡区和主燃区。驻涡区由凹腔提供稳定火焰所必需的回流区, 主要用来稳定火焰, 主燃区用来提供动力。燃料与空气以一定的方式注入凹腔内, 形成稳定的旋涡, 可起到加强涡强度的作用^[9-12]。此旋涡属于流线涡, 其特性只与凹腔的结构参数有关。由于凹腔内流场与主流区的流场相对独立, 所以即使主流空气流速很高, 凹腔内也可以形成稳定的火焰, 不易吹熄, 点火性能优越。

TVC 作为新型燃气轮机燃烧室, 有较宽的稳定燃烧边界^[13-15]、较高的燃烧效率^[16-19], 同时还有结构简单紧凑^[20]、低污染排放^[21-24]、出口温度分布均匀^[25-26]等优点。

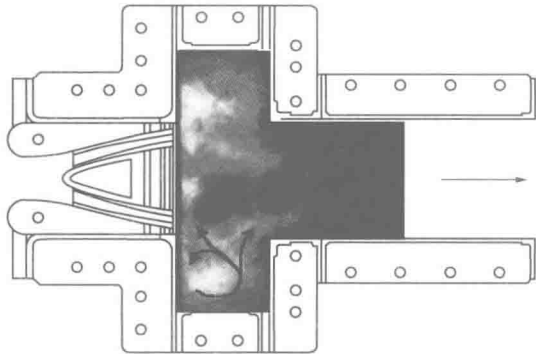


图 1-1 驻涡燃烧室

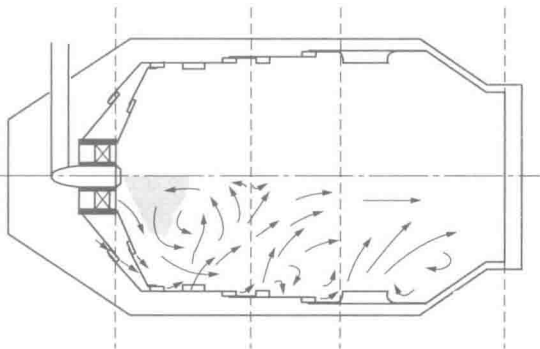


图 1-2 常规旋流器燃烧室

先进旋涡燃烧室 (advanced vortex combustor, AVC)^[27]是在 TVC 基础上改进的一种钝体稳焰燃烧室, 主要用于旋转冲压发动机, 其模型如图 1-3 所示。其工作原理是, 在燃烧室通道内布置前后两钝体, 依靠钝体之间的凹腔形成旋涡来充当稳定的点火源, 以此来引燃

主燃区域,其燃烧情况如图 1-4 所示。由于钝体的设置,使凹腔内旋涡免受主流高速气流的影响,故其火焰稳定性较强。另外,AVC 还具有结构简单紧凑,长度短,总压损失较小,点火性能、高空点火能力及贫油熄火性能高,贫燃预混燃烧效率可达 99% 以上^[27-28]等优点,其综合性能明显优于常规燃烧室,得到国内外广泛关注。



图 1-3 先进旋涡燃烧室模型

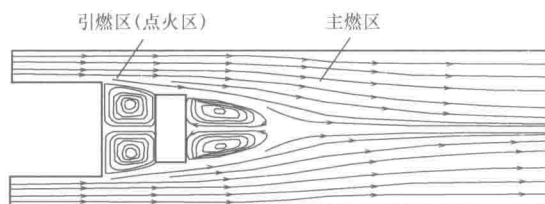


图 1-4 先进旋涡燃烧室燃烧情况

因此,对先进旋涡燃烧室开展结构及机理上的深化研究十分必要。研究不仅可以改善 AVC 综合性能,拓展对 AVC 湍流燃烧特性及传热规律的认识,而且对凹腔稳焰、钝体火焰稳定器的研究和发展有一定的促进作用。

第三节 国内外研究现状

AVC 是在 TVC 基础上发展起来的,二者一脉相承,从结构上看,AVC 就是一种中心钝体式 TVC;从原理上看,AVC 与 TVC 在稳焰机理方面相似,都是通过产生凹腔旋涡来稳定火焰,且 TVC 发展时间长,实验数据积累多,因此 TVC 的研究历程可对 AVC 的研究思路提供参考和借鉴。归纳起来,目前国内外对二者的研究主要集中在以下几个方面。

1. 钝体结构参数优化

通过冷态及热态工况下的数值模拟或者实验可以得出较为统一的钝体最优结构参数,即后钝体与前钝体的宽度比为 0.7 左右,凹腔长度与前钝体宽度比为 0.6 左右。在此钝体结构参数下燃烧室可以实现低压降的稳定燃烧。

2. 凹腔内喷射的研究

通过在凹腔前后壁面不同位置设置喷射孔或喷管,得到燃料以及空气喷孔的喷射角度^[31]、喷孔位置^[32]及喷孔直径^[33],确定了最佳燃气喷射比例^[33],研究了凹腔供油位置对流场的影响^[34],并且通过适当的射流参数实现了凹腔内双旋涡结构。

(1) 在 AVC 内引入喷射,可以改善燃料的混合性能,提高燃烧效率,建立和增强驻涡腔的旋涡,形成低速回流区,而且形成相对独立的化学配比环境,并可以根据燃烧情况调节燃料与空气的供给量^[31-33]。

(2) 在冷态下研究后钝体喷射角度的影响^[31],发现凹腔内均形成双旋涡流动结构,凹腔上下侧间相互独立,形成了有利于值班火焰的流动条件,且后钝体射流最佳喷射角度为向内 70°到向外 80°。

(3) 针对后钝体喷孔位置对驻涡腔流动影响进行的冷态数值研究结果表明:后钝体喷孔位置对凹腔的总压损失、喷射质量流率影响较小;随着喷射位置向后驻体外侧偏移,驻涡腔

内的流场平均流速有所降低，可形成有利于稳定火焰的流动条件，且计算预测的变化趋势与实验结果相同^[32]。

(4) 对配置于前钝体中心及后钝体外侧的喷射口，以不同开口大小向流场喷射气体时对凹腔内部形成驻涡流场区及主流区的影响进行的冷态数值模拟结果表明：前钝体喷射孔直径为后钝体喷射孔直径的 3 倍时，驻涡腔内形成有旋涡的流场平均流速低，驻涡稳定性好，且 TVC 整体流动阻力较低^[33]。

(5) 采用粒子图像测速法 (PIV) 技术可对凹腔供油位置不同时凹腔内的冷态流场进行对比研究，研究分析了来流速度对凹腔内旋涡的形成及稳定性的影响，得出不同供油位置对旋涡稳定的影响。实验结论可为驻涡燃烧室进一步热态燃烧性能实验研究提供依据。

3. 降低污染物的排放

(1) 将 TVC 技术与 RQL 技术结合，可设计出 RQL 驻涡燃烧室模型件 (如图 1-5 及图 1-6 所示)，并用实验及数值模拟研究 RQL 驻涡燃烧室的燃烧性能以及排放性能，获得 RQL 驻涡燃烧室性能的影响参数，确定结构优化方案，为发展 RQL 驻涡燃烧室技术奠定基础，为探索和设计新型的高性能低排放燃烧室提供新想法和新思路。

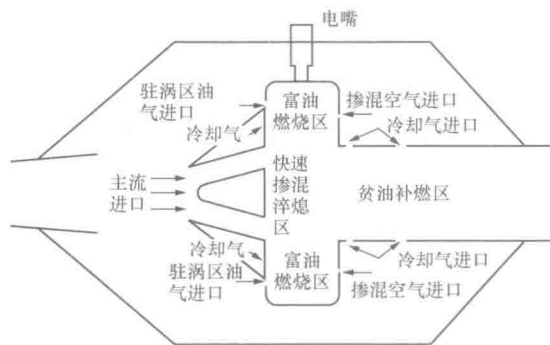


图 1-5 RQL 驻涡燃烧室结构及原理图

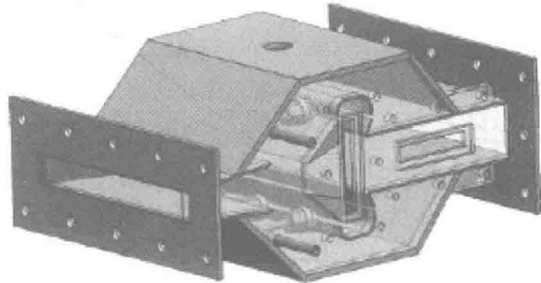


图 1-6 RQL 驻涡燃烧室模型件

(2) 为了探索低排放的驻涡燃烧室技术，可将 TVC 技术与 LPP 技术结合，设计出 LPP 驻涡燃烧室模型件 (如图 1-7 及图 1-8 所示)。研究了 LPP 供油模式、联焰板及冷却系统的设计，驻涡区和主流油气参数的优化，并用实验及数值模拟研究了 LPP 驻涡燃烧室的燃烧性能以及排放性能。研究结果显示在高效燃烧下可以实现降低污染物排放的效果，为发展新型高效低排放驻涡燃烧室技术奠定了基础。

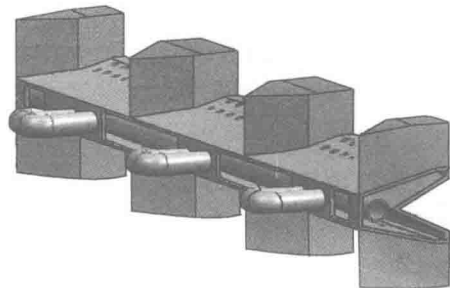


图 1-7 主流 LPP 结构



图 1-8 LPP 驻涡燃烧室实验现场图

(3) 通过凹腔内产生双涡的方法也能降低旋涡燃烧室污染物排放量。富氢合成气或纯氢气体 IGCC 燃气轮机的 AVC 结构设计已有相关的理论依据, 对 AVC 气流流动特性受燃烧室几何参数影响规律进行的实验研究表明, AVC 技术是氢燃料 IGCC 燃气轮机最理想的燃烧技术之一。氢燃料 AVC 物理模型及核心实验件分别如图 1-9 及图 1-10 所示。

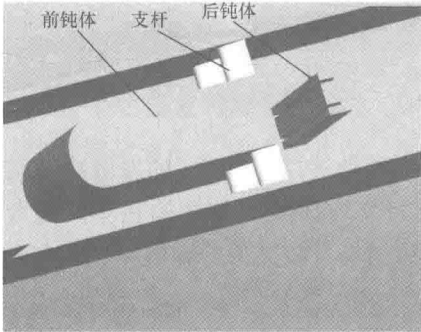


图 1-9 氢燃料 AVC 物理模型

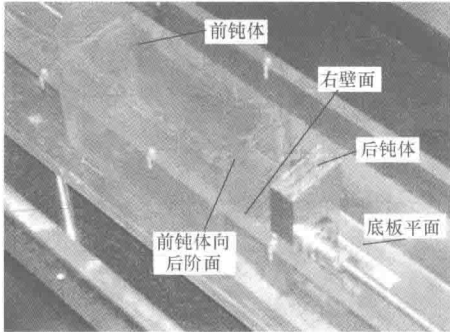


图 1-10 氢燃料 AVC 核心实验件

4. 强化燃料与空气掺混

旋转流线涡技术也可应用到驻涡燃烧室的研究中, 即在常规 TVC (如图 1-11 所示) 的主流进气段增加了三个轴向旋流器 (如图 1-12 所示), 将旋流燃烧技术与驻涡燃烧技术结合, 通过旋流器的强旋流作用, 使主流燃料立体化地旋转起来, 在凹腔内形成产生三维旋转的流线涡, 增强传热传质, 从而改善燃烧性能。数值研究表明此技术可以增强燃气掺混效果, 有效提高燃烧效率, 火焰长度比常规 TVC 更短, 且具有更好的流场结构, 但总压力损失会增加 2% 左右。

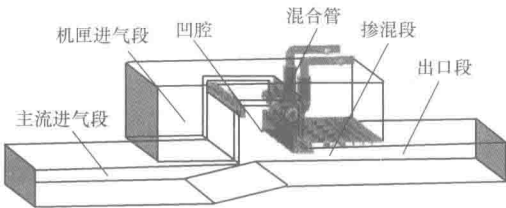


图 1-11 常规 TVC



图 1-12 旋转流线涡 TVC

5. 燃烧室壁面温度分布的研究

通过对驻涡燃烧室火焰筒壁面的冷却技术进行研究, 得到火焰筒壁面的高温分布规律, 对比分析了各种先进冷却技术的优缺点, 结合 TVC 流量分配要求, 设计了高效的 TVC 冷却结构 (如图 1-13 及图 1-14 所示), 为 TVC 冷却结构设计提供思路, 并为其在工程方面的应用提供技术积累。

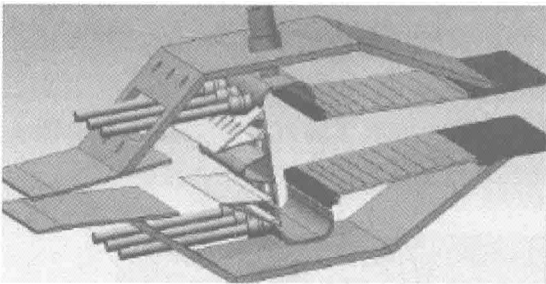


图 1-13 带气膜冷却孔的 TVC

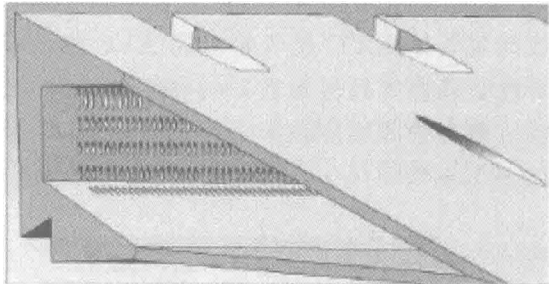


图 1-14 TVC 冷却系统

也有研究学者提出了发散冷却方案，并设计了两种适用于 TVC 的发散冷却结构（如图 1-15 所示），发散孔的倾角分别为 30° 及 150° 。通过实验研究冷却结构在不同位置、不同温比、不同吹风比下的冷却效果，表明两种冷却结构均具有较高的冷却效率，且与数值模拟结果相吻合。

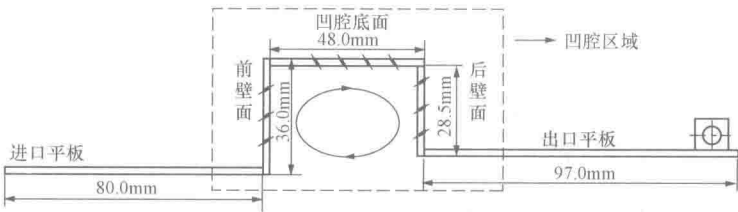


图 1-15 发散冷却 TVC 试验件

6. 凹腔双涡结构研究

在凹腔前壁面喷入燃料，后壁面底部吹入空气只能形成单涡结构，如图 1-16 所示。在凹腔前壁面喷入燃料，后壁面中部吹气能够在凹腔内形成双旋涡结构（如图 1-17 所示），下侧的大旋涡在燃烧中起稳定点火源的作用，上侧的小旋涡靠近主流，有利于主流与热源充分掺混，提高燃烧性能。另外，凹腔双旋涡结构最有利于驻涡燃烧室综合性能的发挥。

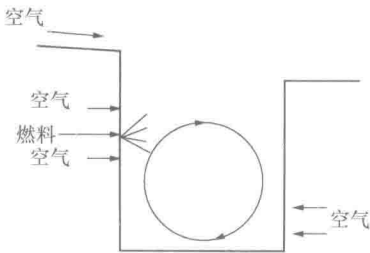


图 1-16 凹腔单涡结构

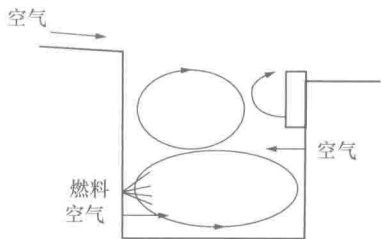


图 1-17 凹腔双涡结构

对凹腔双驻涡稳焰冷态流场进行的研究发现，存在一个最佳的后壁面吹气速度使得凹腔流场稳定，形成理想的双涡结构。凹腔内双涡驻涡燃烧冷态流场图如图 1-18 所示。

改变主流参数和凹腔尺寸，对双涡贫油驻涡燃烧室的熄火特性进行实验研究（如图 1-19 所示）发现，随着主流马赫数的增大，贫油熄火余气系数减小；主流速度是影响贫油熄火

火性能的最主要因素；双涡试验件后体进气量的增加可以使贫油熄火性能变差，不同的凹腔几何结构对贫油熄火余气系数的影响很大。综合各试验结果发现，当深宽比为 0.88 时，双涡试验件的贫油熄火性能最好。

应用图 1-20 所示的模型可通过实验手段对燃烧室出口温度及污染物排放进行测量。研究结果显示，TVC 是低污染燃烧室，相同余气系数下燃烧室出口污染物排放可降低 50%，TVC 凹腔内双涡结构对燃烧室出口温度场分布、污染物排放起着重要作用。其工作机理主要是通过凹腔内产生的双涡结构流场，在凹腔内组织不同的燃料浓度场，实现分级燃烧，最终达到低污染排放的目标。

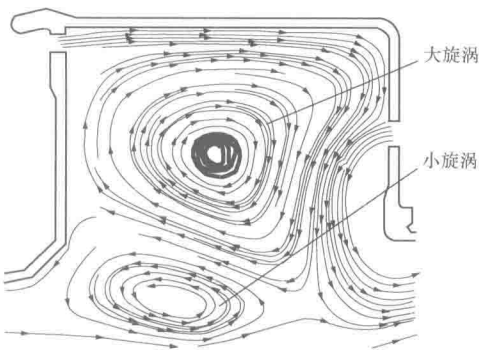


图 1-18 双涡驻涡燃烧室冷态流线图

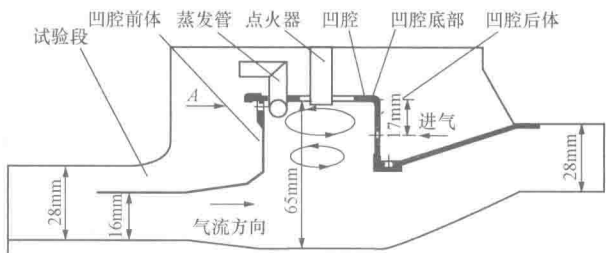


图 1-19 双涡驻涡燃烧室试验件图

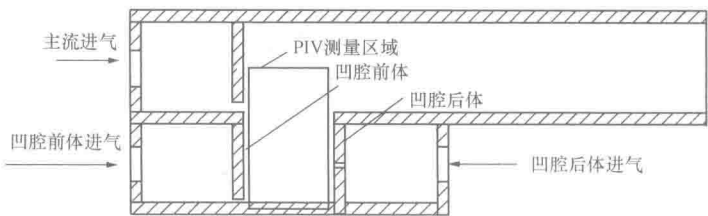


图 1-20 二维驻涡燃烧室简图

7. 涡轮级间燃烧室

中国航空动力机械研究所在驻涡燃烧室方面开展了大量的研究工作，特别是在将驻涡燃烧室作为某型涡轴发动机的涡轮级间燃烧室方面做了一系列的理论及实验研究。图 1-21 为涡轮级间驻涡燃烧室原理示意图。

(1) 相关研究以涡轮级间燃烧室应用于涡轴发动机为背景，利用 TVC 技术和涡轴发动

机燃气涡轮与动力涡轮之间的过渡段空间，在国内首次设计并加工了全环涡轮级间燃烧室试验件，开展全环涡轮级间燃烧室全参数性能试验研究，验证了涡轮级间燃烧室在涡轴发动机上的应用可行性。级间驻涡燃烧室应用于涡轴发动



图 1-21 涡轮级间驻涡燃烧室原理示意图



机中的结构示意图如图 1-22 所示。

(2) 另有研究以应用于某型涡轴发动机的涡轮级间 TVC 燃烧室为研究背景，设计并加工了多方案三头部涡轮级间燃烧室试验件，并实验研究了主流马赫数、主流温度、凹腔深宽比及凹腔后体高度变化对其贫油熄火性能的影响。

(3) 美国空军实验室^[50]将凹腔级间燃烧室应用于主燃烧室，并与常规发动机做了比较，如图 1-23 所示，可见这种情况下发动机的长度及质量将明显减小。

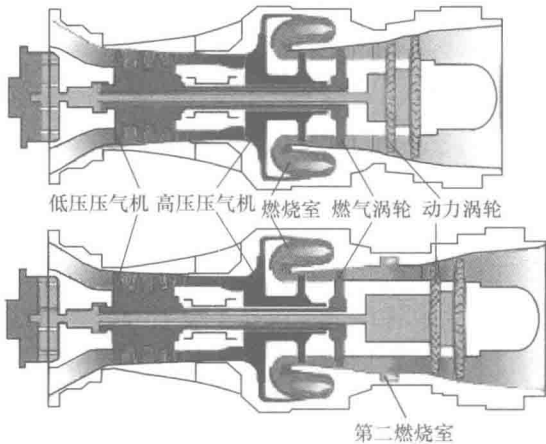


图 1-22 级间驻涡燃烧室应用于涡轴发动机

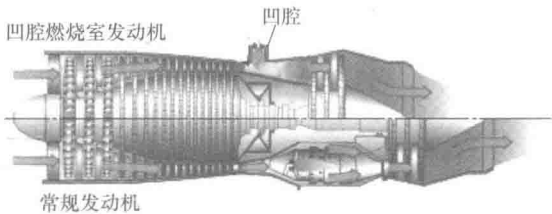


图 1-23 凹腔燃烧室发动机与常规发动机比较

8. 双驻涡腔 TVC 研究

欧洲核能机构^[51]在 2008 年设计了一种带 CH_4 喷射孔的双驻涡腔 TVC (如图 1-24 所示)，并对其进行了实验研究。实验表明可以通过钝体盘多孔燃料喷射来实现高效燃烧。罗马第三大学^[51]以氢气为燃料对 ENEA 设计的 TVC 的燃烧流动性能及稳定性进行了数值研究，仿真模型如图 1-25。结果表明 ENEA TVC 可以在更宽的操作范围内实现高燃烧效率、低污染的目标，并指出下一步工作是通过大涡模拟来仿真该燃烧室的各项性能。

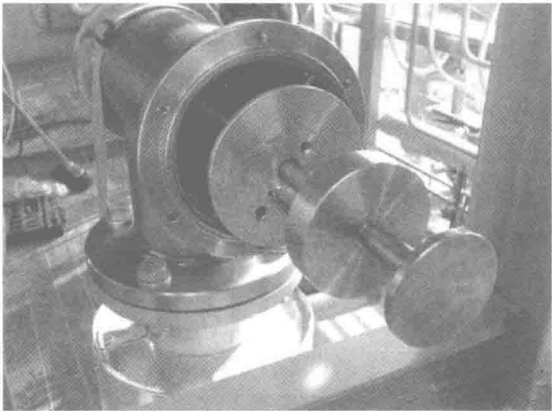


图 1-24 ENEA TVC

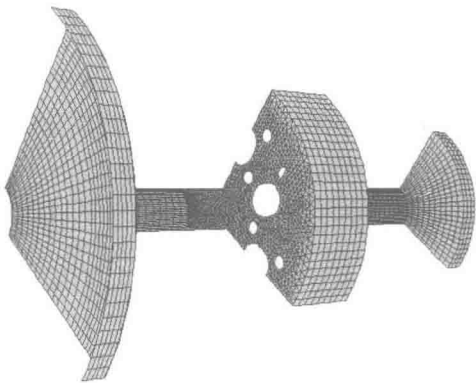


图 1-25 罗马第三大学 TVC 仿真模型

参 考 文 献

- [1] 彭泽琰, 刘刚, 桂幸民, 等. 航空燃气轮机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 林宏军, 程明, 何小民. 驻涡燃烧室的研究进展和应用浅析[J]. 航空科学技术, 2011(4): 68-70.
- [3] 蒋波. RQL 驻涡燃烧室排放性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [4] Hsu K Y, Goss L P, Trump D D, et al. Performance of a trapped-vortex combustor[R]. AIAA-95-0810.
- [5] Zhang R, Fan W. Experimental study of entrainment phenomenon in a trapped vortex combustor[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(1): 63-73.
- [6] 邓杨波, 钟兢军. 旋转冲压发动机驻涡燃烧技术研究现状分析[J]. 燃气涡轮实验与研究, 2006, 19(3): 58-62.
- [7] Jin Y, He X, Zhang J, et al. Numerical investigation on flow structures of a laboratory-scale trapped vortex combustor[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66(1): 318-327.
- [8] 韩吉昂, 李晓东, 钟兢军, 等. 喷射速度对环形 TVC 冷态流场的影响[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(5): 867-872.
- [9] Xing F, Wang P, Zhang S, et al. Experiment and simulation study on lean blow-out of trapped vortex combustor with various aspect ratios[J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 18(1): 48-55.
- [10] Merlin C, Domingo P, Vervisch L. Large Eddy Simulation of turbulent flames in a Trapped Vortex Combustor (TVC) - A flamelet presumed-pdf closure preserving laminar flame speed[J]. Comptes Rendus Mécanique, 2012, 340(11): 917-932.
- [11] Agarwal K K, Ravikrishna R V. Experimental and numerical studies in a compact trapped vortex combustor: stability assessment and augmentation[J]. Combustion Science and Technology, 2011, 183(12): 1308-1327.
- [12] Lee J G, Armstrong J P, Santavicca D A. Experiments on lean blowout and NO_x emissions of a premixed trapped vortex combustor with high G-loading[C]//ASME 2011: 1149-1158.
- [13] Ezhil Kumar P K, Mishra D P. Numerical investigation of the flow and flame structure in an axisymmetric trapped vortex combustor[J]. Fuel, 2012, 102: 78-84.
- [14] Jin Y, He X, Jiang B, et al. Effect of cavity-injector/radial-strut relative position on performance of a trapped vortex combustor[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 32(1): 10-18.
- [15] Zhang R, Fan W. Flow field measurements in the cavity of a trapped vortex combustor using PIV[J]. Journal of Thermal Science, 2012, 21(4): 359-367.
- [16] Ezhil Kumar P K, Mishra D P. Numerical modeling of an axisymmetric trapped vortex combustor[J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 2011, 28(1): 41-52.
- [17] Kulshreshtha D B, Channiwalwa S A. Trapped vortex combustion chamber: design and experimental investigations using hydrogen as fuel[J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2014, 95(1): 69-75.
- [18] Ghenai C, Zbeeb K, Janajreh I. Combustion of alternative fuels in vortex trapped combustor[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65: 819-828.
- [19] Jin Y, Li Y, He X, et al. Experimental investigations on flow field and combustion characteristics of a model trapped vortex combustor[J]. Applied Energy, 2014, 134: 257-269.
- [20] 孔昭健, 樊未军, 易琪, 等. 采用蒸发管供油的驻涡燃烧室点火及贫油熄火特性[J]. 航空动力学报,



- 2007, 22(7): 1132-1137.
- [21] Mancilla P C, Chakka P, Acharya S. Performance of a trapped vortex spray combustor[C] //ASME Turbo Expo 2001-GT-0058.
- [22] Brankovic A, Ryder J R C, Hendricks R C, et al. Measurement and computation of supersonic flow in a lobed diffuser-mixer for trapped vortex combustors[J]. NASA/TM-2002-211127.
- [23] Sekar B, Thornburg H, Briones A, et al. Effect of trapped vortex combustion with radial vane cavity arrangements on predicted inter-turbine burner performance[R]. AIAA 2009-4603.
- [24] Zhang R C, Fan W J, Shi Q, et al. Combustion and emissions characteristics of dual-channel double-vortex combustion for gas turbine engines[J]. Applied Energy, 2014, 130: 314-325.
- [25] 邢菲, 樊未军, 柳杨, 等. 凹腔油气匹配对驻涡燃烧室点火性能影响试验[J]. 推进技术, 2008, 29(4): 412-416, 421.
- [26] Dobbeling K, Eroglu A, Winkler D, et al. Low NO_x premixed combustion of mbtu fuels in a research burner[J]. ASME. Engineering for Gas Turbines and Power, 1997, 119: 553-558.
- [27] Edmonds R G, Steele R C, Williams J T, et al. Ultra-low NO_x advanced vortex combustor [R]. ASME 2006-GT-90319.
- [28] 邓洋波, 刘世青, 钟兢军. AVC中钝体布置与燃烧室流动特性研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 1415-1418.
- [29] 孙海俊, 曾卓雄, 徐义华. 先进旋涡燃烧室钝体结构参数选择的数值分析[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(6): 99-102.
- [30] 何小民, 王家骅. 驻涡火焰稳定器冷态流场特性的初步研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 567-571.
- [31] 刘世青, 钟兢军. 驻涡燃烧室后驻体喷射角度影响冷态数值研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(8): 1065-1072.
- [32] 钟兢军, 刘世青. 后驻体喷孔位置对驻涡腔流动冷态数值的影响[J]. 上海海事大学学报, 2011, 32(1): 44-48.
- [33] 刘世青, 钟兢军, 程平. 喷射孔径影响驻涡燃烧室性能冷态数值研究[J]. 汽轮机技术, 2010, 52(2): 107-111.
- [34] 刘河霞, 刘玉英, 李瑞明, 等. 驻涡燃烧室凹腔供油位置对流场影响的 PIV 实验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2272-2276.
- [35] 蒋波. RQL 驻涡燃烧室排放性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [36] 田中礼. LPP 驻涡燃烧室排放性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [37] 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.
- [38] 邓洋波, 孙海涛, 王玉龙, 等. 氢燃料先进旋涡燃烧室流动和燃烧特性[J]. 航空动力学报, 2013, 28(1): 120-128.
- [39] 张智博, 李智明, 杨洪磊, 等. 旋转流线涡技术对驻涡燃烧室性能的影响[J]. 热科学与技术, 2013, 12(2): 141-147.
- [40] 王璐. 某型驻涡燃烧室冷却技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [41] 张荣春, 樊未军, 宋双文, 等. 驻涡燃烧室发散冷却方案试验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2667-2675.
- [42] Meyer T R, Brown M S, Fonov S, et al. Optical Diagnostics and Numerical Characterization of a Trapped-vortex Combustor[R]. AIAA 2002-3863.

- [43] Stone C, Menon S. Simulation of Fuel-air Mixing and Combustion in a Trapped-vortex Combustor[R]. AIAA 2000-0478.
- [44] 邢菲, 孟祥泰, 李继保, 等. 凹腔双驻涡稳焰冷态流场初步研究[J]. 推进技术, 2008, 29(2): 135-138.
- [45] 张韬, 宋双文, 樊未军, 等. 双涡/贫油驻涡燃烧室的贫油熄火特性试验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(6): 1328-1333.
- [46] 樊未军, 易琪, 严明, 等. 驻涡燃烧室凹腔双涡结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 66-70.
- [47] 宋双文, 胡好生, 王梅娟, 等. 涡轮间燃烧室贫油熄火特性的试验研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(5): 10-12, 35.
- [48] 宋双文, 胡好生, 王梅娟, 等. 全环涡轮级间燃烧室性能试验[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2175-2179.
- [49] 宋双文, 雷雨冰, 姚尚宏, 等. 可压流条件下凹腔驻涡流动试验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(10): 2267-2273.
- [50] Bohan B T, Polanka M D. Analysis of flow migration in an ultra-compact combustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(5): 051502.
- [51] Di Marco A. Numerical analysis of the hydrogen combustion in a double cavity trapped Vortex combustor[D]. Ph. D Thesis, Università degli studi di Roma Tre, 2009.
- [52] 孙海俊, 曾卓雄, 徐义华. 横向射流对凹腔湍流特性影响的数值模拟[J]. 推进技术, 2013, 34(1): 54-61.
- [53] 王志凯, 曾卓雄, 徐义华. 先进旋涡燃烧室后钝体开口结构的数值研究[J]. 推进技术, 2014, 35(6): 809-814.
- [54] 孙海俊, 曾卓雄, 徐义华. 钝体改进结构对 AVC 燃烧流动特性影响研究[J]. 航空动力学报, 2014, 29(7): 1639-1646.
- [55] 王志凯, 曾卓雄, 徐义华. 基于涡流发生器原理的先进旋涡燃烧室燃烧特性研究[J]. 推进技术, 2015, 36(1): 75-81.
- [56] 王志凯, 曾卓雄, 徐义华. 导流片结构参数对先进旋涡燃烧室性能影响研究[J]. 推进技术, 2015, 36(3): 405-412.
- [57] 徐舟, 曾卓雄, 徐义华. 含导流片及钝体的驻涡燃烧室的结构优化[J]. 推进技术, 2015, 36(7): 1020-1026.
- [58] 曾卓雄, 王志凯, 田佳莹, 等. 先进旋涡燃烧室多场协同分析[J]. 推进技术, 2015, 36(12): 1859-1867.
- [59] Zeng Zhuoxiong, Ren Jianxing, Liu Xiaojing, Xu Zhou. The unsteady turbulence flow of cold and combustion case in different trapped vortex combustor[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90: 722-732.