

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.011

基于引射旋流器的驻涡燃烧室燃烧特性研究

龚诚, 李雯玉, 郝颜, 赵姝帆, 邱名

(中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621051)

摘要:为进一步拓宽驻涡燃烧室内主燃级的火焰稳定范围,研究一种新型的引射旋流器对旋流驻涡燃烧室性能的影响。该旋流器出口设置的径向引射槽增强了值班级与主燃级之间的质量交换,从而促进值班级高温热源向主燃级输运。数值模拟结果表明:径向 V 型引射槽能够对值班级的高温燃气起到导流的作用,其在旋流器后产生的特有漩涡结构有利于主燃级油气与值班级高温燃气的混合。仅值班级供油时,引射旋流器后方可见明显的高温带,能显著改善主燃级火焰稳定特性,表明新型旋流驻涡燃烧室在不同工况下有更好的燃烧特性。低速进气时,相比于常规旋流驻涡燃烧室效率提高 21.81%,高速进气效率提高 11.89%。

关键词:旋流驻涡;引射旋流器;燃烧室;数值模拟;燃烧效率

中图分类号:TK16 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0057-05

Research of Trapped Vortex Combustor Based on Ejection Swirler

GONG Cheng, LI Wenyu, HAO Yan, ZHAO Shufan, QIU Ming

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621051, China)

Abstract: In order to expand the flame stabilization scope of trapped vortex combustor (TVC), the paper studies the effect of a new ejection swirler on the performance of swirl trapped vortex combustor. The radial ejection slot is installed at the outlet of the swirler to enhance the mass transfer between the primary combustion stage and main combustion stage. The numerical simulation results show that the radial V-shaped ejection slot has an effect on high temperature gas division for primary combustion stage, and the unique structure of the ejection swirler is conducive to the mixing of oil gas of main combustion stage and high temperature gas of primary combustion. When only primary combustion stage is supplied with oil, the evident high temperature zone of rear ejection swirler can significantly improve the flame stabilization, which indicates that the ejection TVC has even better combustion features in different working conditions. At low speed flow intake, compared with conventional TVC, the efficiency is increased by 21.81%, and the high speed air intake efficiency is increased by 11.89%.

Keywords: trapped vortex; ejection swirler; combustor; numerical simulation; combustion efficiency

0 引言

驻涡燃烧室作为新一代具有军用前景的火焰稳定性能良好的燃烧室^[1-4],其主燃级油气混合差、驻留时间短、火焰偏长等缺陷导致其未广泛运用^[5]。张智博、张秋峰等^[6-7]在驻涡燃烧室中引入旋流器,为下游引入回流区结构,增强了主燃与凹腔交换能量的能力。

目前针对采用液态燃料的驻涡燃烧室油气组织方法的研究较少^[8-9],使用液态燃料替代气态燃料时会造成局部温度过高,无法运用于工程实际^[10-15]。本文基于驻涡旋流燃烧室,研究了当来流为常温常压、液态煤油油温为常温、仅值班级供油时,常规旋流器和引射旋流器对值班级高温燃气流动的影响,从气体流动层面解释了两种旋流器稳焰效果,并对引射旋流器如何起到稳焰效果

做了理论分析。

1 高通流驻涡旋流燃烧室

1.1 燃烧室结构

基于单凹腔旋流驻涡燃烧室概念模型,如图 1 所示,气流通过旋流器、前挡板和冷却结构进入火焰筒,实现与燃气的燃烧、掺混以及冷却。

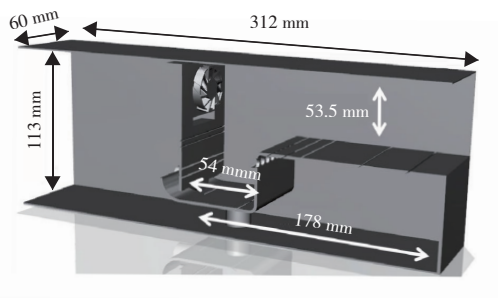


图 1 燃烧室结构

第一作者简介:龚诚(1984—),男,湖北宜城人,助理研究员,博士,研究方向为发动机高性能推进方式,15851863535@163.com。

1.2 新型旋流器概念提出

常规旋流器存在掺混能力不足,本文基于一种新型旋流装置,如图2、图3所示,促进主燃级油气混合与燃烧,从而改善驻涡燃烧室主燃级出口温度分布特性。新型旋流器最大特点在于所述叶片迎风面与背风面采用分体式结构,其中所述叶片迎风面的旋流安装角度大于背风面安装角度,以形成不同张角的空腔区域。

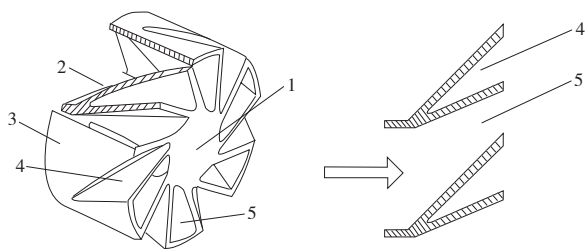


图2 引射旋流器结构

图3 Y型叶片造型

1—旋流器中心轴;2—旋流器外壳;3—旋流器叶片;
4—旋流器引射槽;5—旋流器通道。

2 数值模拟方法及验证

在 Fluent 软件平台上,采用 RANS 输运方程求解。根据文献中的研究成果^[16],采用 Fluent 中标准壁面函数的两方程 $k-\varepsilon$ 湍流模型, y^+ 保证在 30~300 即可满足计算精度要求。速度-压力通过标准的 SIMPLE 算法求解,时间 2 阶隐式,空间 2 阶迎风格式。对于离散相,采用经典的拉格朗日颗粒追踪方法。对于湍流燃烧,基于煤油 203 组分 1 592 步反应详细机制建表的火焰面-反应进度变量 (flamelet progress - variable, FPV) 模型^[17-19]。前期已对旋流燃烧数值模拟方法进行了评估。证明了该数值模拟方法可以对旋流燃烧提供可靠的预测作用,可适用于本文对旋流驻涡燃烧室的研究。

3 数值结果及分析

本文模拟工况如表1所示。

表1 各计算工况参数

参数	算例及旋流器类型			
	a 引射	b 常规	c 引射	d 常规
进气速度/(m/s)	6	6	10	10
总油气比	0.011	0.011	0.011	0.011
值班级油气比	0.023	0.023	0.023	0.023
主燃级燃油流量/(g/s)	0	0	0	0
值班级燃油流量/(g/s)	0.50	0.50	0.83	0.83

3.1 低速进气

两种旋流驻涡燃烧室值班级高温燃气由两侧壁面向主燃级油气形成包裹,引射旋流器与高温燃气接触面更大,壁面位置温度较高,如图4所示,对燃油的预加温效果更加明显。由于引射旋流器的特殊结构,在主燃级不供油的状态下,可以明显观察到值班级高温燃气向主燃级转移,如图5所示(将与轴向平行的中心截面命名为 MA 截面),旋流器后方出现高温区域,有利于主燃级的点燃以及火焰稳定;而常规旋流驻涡燃烧室中,值班级与主燃级混合较差,如图6所示,凹腔正常着火,高温燃气未进入旋流器后漩涡内部对燃油蒸发能力弱,掺混能力弱。图5、图6显示了本驻涡燃烧室凹腔着火现象明显,火焰结构偏上,形成的驻涡饱满。图7展示了3个轴向位置的速度矢量图,A、B、C 3个截面分别代表3%、14%、32%火焰筒相对位置,可以观察到两种旋流器后方形成了与叶片旋向一致的顺时针漩涡,凹腔内气流沿着燃烧室两侧壁面向上将主燃区气体包裹住,由于壁面流速一侧与漩涡旋向相同,一侧与旋向相反,在相反的那一侧产生副涡结构。由于气流的黏性作用,反向运动侧的气流具有更强的能量传递效果,在主燃级进行供油时,左侧温度更高更易着火。副涡结构挤压主涡,使主燃区气体向另一侧偏移,驻涡旋流燃烧室中并不是对称的流态。工况 a 主燃区气体经旋流器进入火焰筒后,形成的顺时针的漩涡,与来自于下部凹腔的高温燃气相遇,高温燃气经 V 型槽进入漩涡内部,对主燃级气体进行升温。相应的来自旋流器的主燃区气流,对高温燃气进行掺混补燃。在漩涡中心形成稳定的高温热源;工况 b 中,来自凹腔内高温气体顺着两侧壁面对漩涡进行包裹,中心温度较低,传热传质效果不明显。

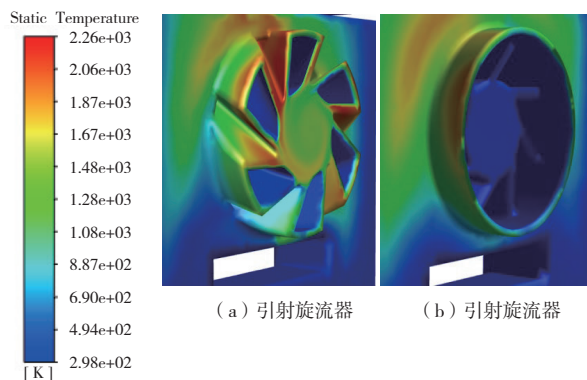


图4 进气速度为 6 m/s 时旋流器壁面静温分布

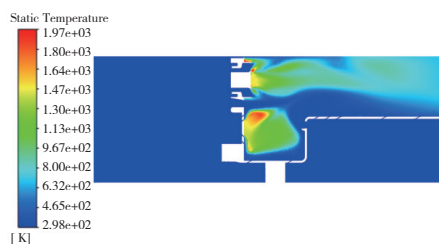


图5 进气速度为 6 m/s 时引射旋流驻涡燃烧室 MA 截面温度云图

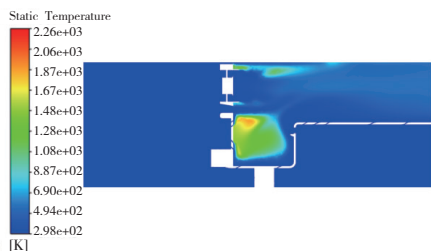


图6 进气速度为 6 m/s 时常规旋流驻涡燃烧室 MA 截面温度云图

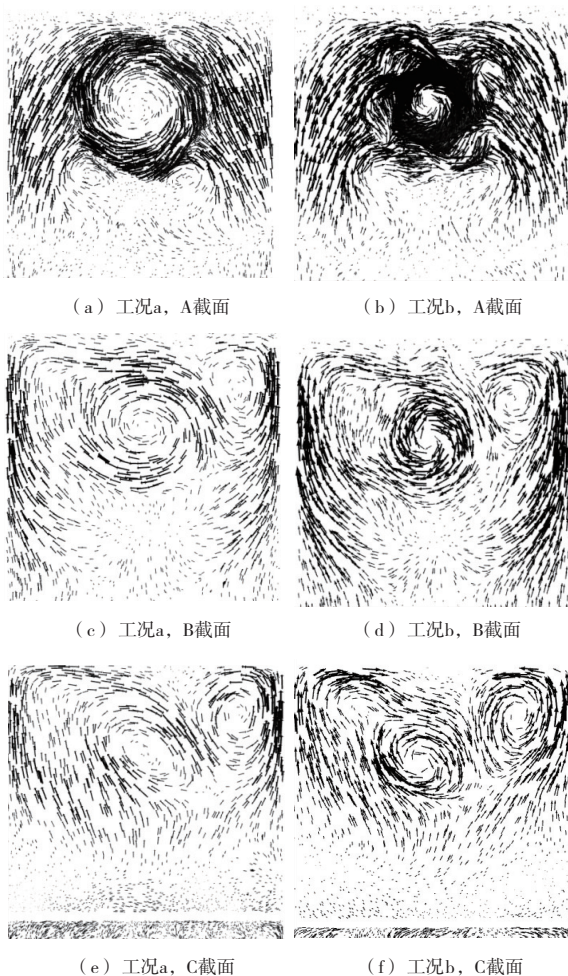


图7 进气速度为 6 m/s 时两种燃烧室轴向截面速度矢量图

图8、图9为轴向A、B、C 3个不同截面的温度分布云图。工况a主燃区气体经旋流器进入火焰筒后形成顺时针的漩涡,与来自于下部凹腔的高温燃气相遇,由于V型槽的引流效果,高温燃气进入漩涡内部,进一步掺混补燃,在漩涡中心形成稳定的高温热源;工况b中,来自凹腔内高温气体顺着两侧壁面对漩涡进行包裹,该部分气体动量不足,流体无法进入漩涡内部,只能跟随漩涡旋转,导致中心温度较低,传热传质效果不明显。本研究侧重于常温燃油进口的极端条件,燃油经雾化后需要更多的能量达到燃点,与空气发生反应,显然常规旋流器无法满足该要求。

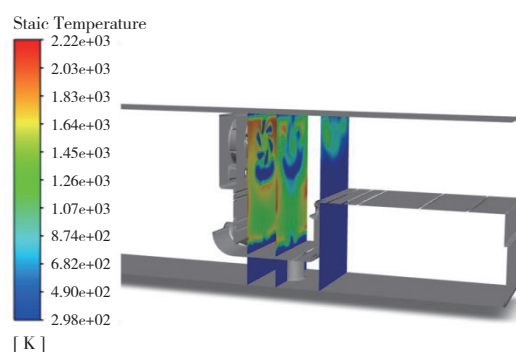


图8 工况a轴向截面温度云图

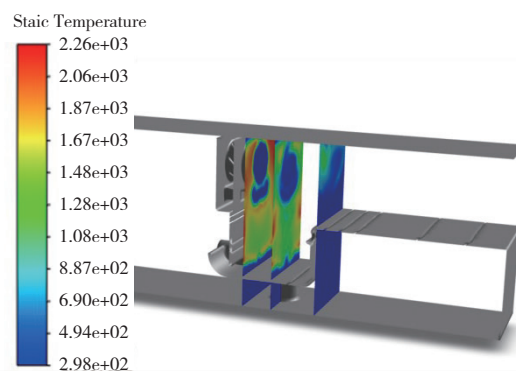


图9 工况b轴向截面温度云图

3.2 高速进气

空气进口速度为 10 m/s 时,两种燃烧室凹腔着火明显,如图10、图11所示,表明了驻涡燃烧室凹腔的着火稳定性强,受来流速度的影响少。常规驻涡旋流燃烧室凹腔内的驻涡无法与主流高速来流产生明显掺混,限制了高温稳定火焰团与主流燃料的传热传质速度,削弱了燃烧室的性能。引射旋流驻涡燃烧室能够保持旋流器后的高温带,值班级着火后,高温燃气随着值班级驻涡运动进入主燃级漩涡。

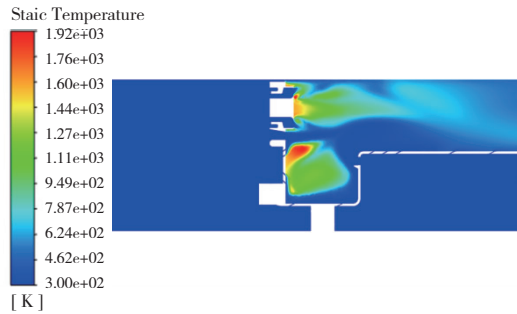


图 10 进气速度为 10 m/s 时引射旋流驻涡燃烧室典型截面温度云图

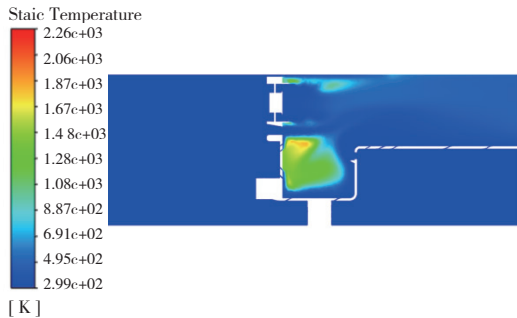


图 11 进气速度为 10 m/s 时常规旋流驻涡燃烧室典型截面温度云图

3.3 不同进气速度下燃烧室特性的讨论

燃烧效率基于式(1)“C”原子定义公式。

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_{CO_2}/M_{CO_2} + 0.531\dot{m}_{CO}/M_{CO}}{\dot{m}_z/M_{fuel} \cdot N_{C,fuel}} \quad (1)$$

来流 6 m/s、油气比为 0.023 时,新型旋流驻涡燃烧室出口效率为 82.17%,常规旋流驻涡燃烧室出口效率为 67.46%。在不给主燃级进行供油时,引射旋流驻涡燃烧室的出口效率远高于常规燃烧室,未充分燃烧的高温燃气进入旋流器后漩涡低压低速区,促进主燃级燃油快速蒸发,再与主流气体二次混合后继续燃烧;常规旋流器后形成的漩涡饱满,燃气无法进入漩涡内部,高温热源只能从外围包裹主燃级油气混合物,凹腔值班级与旋流主燃级之间质量交换较弱,加之来流空气温度较低,主燃级燃油无法快速蒸发,所有主燃区附近无法实现火焰稳定,燃烧效率低。常规旋流器后存在大范围低温区而引射旋流器后温度较高,仅凹腔供油时,旋流器流入的空气作为补燃空气。引射旋流可以增强从凹腔流出的富燃产物与补燃空气之间的相互掺混,所有在燃烧室出口处新构型的燃烧效率更高,如表 2 所示。

表 2 不同工况的出口燃烧效率 单位:%

工况	a	b	c	d
出口效率	82.17	67.46	63.04	55.35

相比之下,引射旋流器卷入来自值班级的高温燃气,使主燃区中心着火,低速进气时沿程效率高于普通旋流驻涡燃烧室,壁面位置未出现高温区,但由于该常规旋流驻涡燃烧室后方燃气再燃,掺混进气大小的不合理,常规效率高于引射效率。

来流 10 m/s、油气比为 0.011 时,新型旋流驻涡燃烧室出口效率为 63.04%,常规旋流驻涡燃烧室出口效率为 55.35%,两种燃烧室效率下降较快。

图 12 表明两种来流情况,带有引射旋流器的驻涡旋流燃烧室沿程效率均高于常规驻涡旋流燃烧室。引射旋流器通过改变流场漩涡结构,主动促进主燃区与凹腔高温热源传热传质,无论是加入哪种旋流器,在凹腔区都会产生回流区域,其大小不受来流速度的影响,有利于主燃区火焰的稳定,起到持续点火的作用。

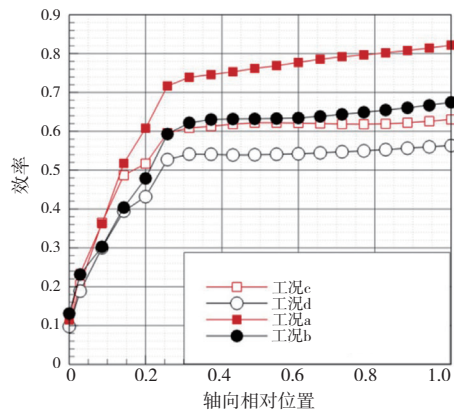


图 12 无量纲坐标沿程效率分布

图 13 为火焰筒沿程混合分数分布,混合分数代表来自于燃料的总气体质量流量,包括蒸发和化学反应两个过程。两种旋流驻涡燃烧室驻涡油气皆在驻涡区完成液态到“气态”的转变,或是蒸发为气态,或是与空气发生反应,成为燃烧产物。高速进气下的混合分数高于低速进气,这是因为为了保证凹腔油气比不变,高速进气时增大了燃油流量,混合分数也增大。图 14 为标量化的混合分数沿程分布,低速进气时,滞留时间长,燃油的蒸发和燃烧效果更加显著。高速进气时,驻涡流速大,燃油在两种燃烧室中均没有完全完成蒸发、燃烧,均在后方进一步转换。

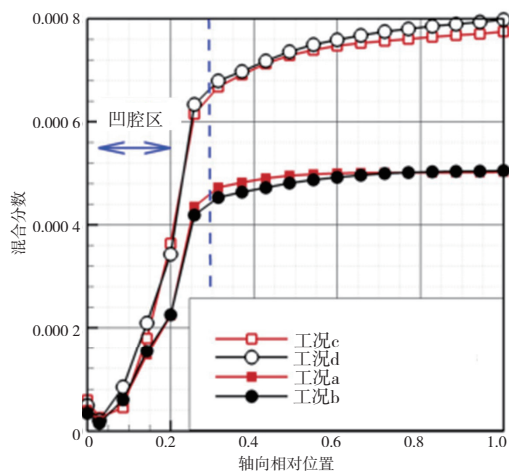


图 13 混合分数沿程分布

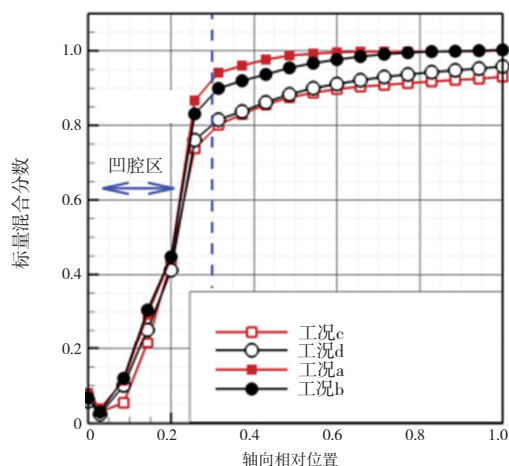


图 14 标量混合分数沿程分布

在高速进气时出现了传统旋流驻涡燃烧室混合分数略高于新型旋流驻涡燃烧室,效率却较低的情况,说明高速进气时,引射旋流器能对一部分来自凹腔的高温燃气进行组织补燃,但由于流速过大,蒸发效果较差。常规旋流驻涡燃烧室中,高温区集中于凹腔内部,燃油蒸发效果较强,所以混合分数略高,这种现象并不利于对主燃级喷入的燃油进行点火和稳定,值班级与主燃级之间的传热传质效果低。另一方面,由于引射槽将外部高温燃气引射至旋流空气内部,减小了旋流空气射流内外的静压差,减弱了旋流流动原有的回流区结构,造成主燃级油气混合物驻留时间缩短,燃烧室出口处空气与燃料的混合效率降低。

在后续的研究中发现:同时对值班级和主燃级供油,高速进气时出现两种旋流驻涡燃烧室效率齐平的情况。由于本文中空气分配是按照常规旋流驻涡燃烧室设计,掺混方案不适用于极端进口条件下的旋流驻涡燃烧组织,所以出现了高速

进气时引射旋流效率略高于常规旋流的结果。下一步将重点研究如何优化火焰筒中流场结构,以提高效率。

4 结语

单凹腔驻涡燃烧室采用不同旋流器稳定主流火焰,引射旋流器通过 V 型槽对凹腔内高温燃气进行引导,与旋流器接触面积大,且在后方形成稳定的高温带,对高温燃气进行补燃。该种旋流器相比于传统旋流器,对液体燃质具有较好的预热、蒸发作用,且不会破坏凹腔驻涡结构。安装有引射旋流器的驻涡燃烧室效率高于传统驻涡旋流燃烧室,有利于高速进气下的燃烧组织。

参考文献:

- [1] HSU K, GROSS L, TRUMP D, et al. Performance of a trapped - vortex combustor [C] // 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV. Reston, Virginia: AIAA, 1995: 810.
- [2] LITTLE B H Jr, WHIPKEY R R. Locked vortex afterbodies [J]. Journal of Aircraft, 1979, 16 (5) : 296-302.
- [3] HSU K Y, GOSS L P, ROQUEMORE W M. Characteristics of a trapped - vortex combustor [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14 (1) : 57-65.
- [4] HENDRICKS R C, SHOUSE D T, ROQUEMORE W M, et al. Experimental and computational study of trapped vortex combustor sector rig with high - speed diffuser flow [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2001, 7 (6) : 375-385.
- [5] 何小民, 许金生, 苏俊卿. 驻涡燃烧室燃烧性能试验 [J]. 航空动力学报, 2009, 24 (2) : 318-323.
- [6] 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.
- [7] 张秋峰, 何小民, 龚诚, 等. 不同旋流器方案下旋流驻涡燃烧室性能 [J]. 航空动力学报, 2023, 38 (7) : 1773-1783.
- [8] ZHAO D, GUTMARK E, DE GOEY P. A review of cavity-based trapped vortex, ultra - compact, high - g, inter-turbine combustors [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 66: 42-82.
- [9] BURRUS D L, JOHNSON A W, ROQUEMORE W M, et al. Performance assessment of a prototype trapped vortex combustor concept for gas turbine application [C] // ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air, New Orleans, Louisiana, USA: [s.n.], 2014.

(下转第 70 页)

- [1] 韩长喜,邓大松,王虎,等. 2022 年雷达技术发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2023, 18(2): 108-112.
- [2] 刘尚争. 未来雷达探测发展重点[J]. 现代雷达, 2022, 44(2): 102-103.
- [3] 高环. 现代相控阵雷达技术发展[J]. 现代导航, 2023, 14(5): 368-375.
- [4] 刘伟涛,聂镇武,孙帅. 量子雷达技术的发展现状及趋势[J]. 国防科技, 2023, 44(4): 5-22.
- [5] 左堃罡,夏善涛,徐杰,等. 某型雷达天线举升机构设计及精度分析[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(1): 76-80.
- [6] 陈光毅,张若愚,任红,等. 基于全息超表面天线的雷达通信一体化波束成形设计[J/OL]. 雷达学报, (2025-04-17) [2025-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1030.TN.20250417.1343.004.html>.
- [7] 陆萍萍,高瑶,孟听雨,等. 合成孔径雷达月球探测研究进展[J]. 遥感学报, 2025, 29(2): 342-361.
- [8] 袁海平,毛桢希. 大型相控阵雷达结构造型设计[J]. 现代雷达, 2025, 47(1): 96-99.

- 收稿日期:2023-09-04

- [10] ZHAO Y L, HE X M, XIAO J K, et al. Effect of cavity-air injection mode on the performance of a trapped vortex combustor [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106183.
- [11] 曾卓雄, 张永祺, 张龙. 旋流对驻涡燃烧室湍流流动的影响[J]. 热科学与技术, 2020, 19(2): 139-145.
- [12] 王志凯, 曾卓雄, 徐义华, 等. 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.
- [13] JIANG B, JIN Y, LIU D, et al. Effects of multi-orifice configurations of the quench plate on mixing characteristics of the quench zone in an RQL-TVC model[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 83: 57-68.
- [14] CLARK N A, POLANKA M D, BOHAN B T, et al. Design and application of a trapped-vortex compact combustor in a small-scale JetCat engine[C] // AIAA SCITECH 2022 Forum. San Diego, CA & Virtual. Reston, Virginia: AIAA, 2022: 2061.
- [15] 李明玉. 驻涡燃烧室油气组织方法研究[D]. 南京:

[16] JIN Y, HE X M, ZHANG J Y, et al. Numerical investigation on flow structures of a laboratory – scale trapped vortex combustor [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66(1/2) : 318-327.

[17] GONG C, ZHAO S F, CHEN W Q, et al. Numerical study on the combustion process in a gas turbine combustor with different reference velocities [J]. Advances in Aerodynamics, 2023, 5(1) : 24.

[18] MEIER U, HEINZE J, FREITAG S, et al. Spray and flame structure of a generic injector at aeroengine conditions [C] // ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, Vancouver, British Columbia, Canada: [s.n.], 2012; 61-72.

[19] IHME M, SHUNN L, ZHANG J. Regularization of reaction progress variable for application to flamelet – based combustion models [J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231(23) : 7715-7721.

收稿日期:2023-09-25