

火焰筒扩张角与旋流匹配对燃烧特性的影响

刘 凯,姜广仁,曾 文

(沈阳航空航天大学 航空发动机学院,辽宁 沈阳 110136)

摘 要:火焰筒头部结构对预混燃烧性能有重要影响,为了探讨旋流器与火焰筒扩张角相互作用关系,试验研究了扩张角为 35° (渐扩)、 90° (突扩)的火焰筒分别匹配旋流数为0.55,0.75旋流器对燃烧性能的影响。试验结果表明:渐扩火焰筒总压损失较突扩火焰筒减小约3.4%~4.4%,且匹配较小旋流数具有更高的总压恢复系数;突扩火焰筒较渐扩火焰筒具有更低的贫油熄火极限,且无论突扩火焰筒还是渐扩火焰筒,匹配较大旋流数旋流器后均具有更低的熄火极限;突扩型火焰筒温度场对旋流器适应性好,各旋流数下均获得较均匀温度场,出口温度分布系数为0.1341~0.1416;渐扩火焰筒温度场对旋流器适应性差,匹配较小旋流数旋流器后温度场均匀性更好,出口温度分布系数为0.1357;突扩火焰筒 NO_x 排放量更低,且匹配小旋流数旋流器更佳;渐扩火焰筒CO和碳氢化合物(UHC)排放更低,且匹配大旋流数旋流器更佳。

关 键 词:火焰筒扩张角;旋流数;贫油熄火;出口温度场;排放指数

中图分类号:V231.2 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.05.012

[引用本文格式]刘 凯,姜广仁,曾 文.火焰筒扩张角与旋流匹配对燃烧特性的影响[J].热能动力工程,2023,38(5):97-102.
LIU Kai, JIANG Guang-ren, ZENG Wen. Influence of flame tube expansion angle and swirl matching on combustion[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 97-102.

Influence of Flame Tube Expansion Angle and Swirl Matching on Combustion

LIU Kai, JIANG Guang-ren, ZENG Wen

(School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang, China, Post Code:110136)

Abstract: The structure of flame tube head has an important influence on premixed combustion performance. In order to explore the interaction relationship between swirler and flame tube expansion angle, the effects of 35° gradual expansion and 90° sudden expansion flame tube head matching swirl number (SN) of 0.55 and 0.75 respectively on combustion performance are experimentally studied. The test results show that the total pressure loss of the flame tube with 35° expansion angle is reduced by about 3.4% to 4.4% compared with that with 90° expansion angle, and the total pressure recovery coefficient is higher matching smaller SN; the 90° expansion angle flame tube has a lower lean oil flameout limit than the 35° expansion angle, and both 90° and 35° flame tubes have a lower lean oil flameout limit when matching larger SN; the outlet temperature field of sudden expansion flame tube has good adaptability to the swirler, a more uniform temperature field can be obtained at each SN, and the outlet temperature distribution factor (OTDF) is 0.1341 to 0.1416; the outlet temperature field of gradual expansion flame tube has poor adaptability to the swirler, but the temperature field uniformity is better with smaller SN, and the OTDF is 0.1357; NO_x emission of sudden expansion flame tube is lower, and it is better to match small

SN; CO and unburned hydrocarbon (UHC) emissions of gradual expansion flame tube are lower, and it is better to match large SN.

Key words: flame tube expansion angle, swirl number (SN), lean oil flameout, outlet temperature field, emission index

引 言

燃气轮机作为一种动力设备应用领域越来越广泛^[1-2]。贫预混燃烧被认为是众多低排放方案中最成熟、最具应用前景的一种低污染燃烧方式^[3-4]。美国 GE 公司、P&W 公司和英国的 RR 公司均发展了自己的贫预混燃烧结构^[5]。贫预混燃烧通过降低燃烧区温度以减少 NO_x 排放,并通过分级燃烧的方式兼顾不同工况下燃烧性能^[6-7]。为实现燃料贫预混,需要 70% 甚至更多的空气由燃烧室头部供入,既要保证掺混均匀,又要兼顾温度场、 NO_x 排放量等各项性能,因此火焰筒头部结构是贫预混燃烧室设计的关键^[8-9]。采用火焰筒头部和旋流器一体化设计,且旋流数为 0.5 以上的中强旋流,对满足燃烧室性能具有良好效果^[10-12]。Yellugari 等人^[13]应用数值模拟的方法研究了燃烧室头部旋流器对流动、燃烧性能的影响,分别针对旋流器叶片安装角 $30^\circ \sim 45^\circ$,对应旋流数 0.6 ~ 1.5 进行了计算分析。Myers 等人^[14]通过试验手段研究了旋流器、主燃射流等对燃烧稳定性、燃烧效率及出口温度场的影响。Reddy 等人^[15]采用数值方法研究了旋流数对燃烧室头部回流区的影响。党新宪等人^[16]试验研究了不同旋流数对燃烧室流场的影响。汤朝伟等人^[17]试验研究了旋流数对氮氧化物生成的影响。刘爱骥等人^[18]研究了旋流数对点熄火性能影响。

由以上分析可以看出,国内外针对燃烧室部件对燃烧性能的影响做了大量研究工作,但主要以单一结构为变量,没有考虑部件之间的相互耦合关系。对于贫预混燃烧室,旋流器与火焰筒头部结构匹配直接影响燃料的掺混及空间分布,进而决定燃烧性能,是设计中的关键问题。本文以某型贫预混燃烧室为研究对象,试验研究了 90° 突扩型和 35° 渐扩型火焰筒,分别匹配旋流数为 0.55 和 0.75 旋流器时对燃烧性能的影响,重点研究火焰筒头部扩张角与旋流数的匹配关系,为贫预混燃烧室设计提供参考。

1 试验系统与试验件

1.1 试验系统

燃烧室性能试验系统框图如图 1 所示。图中 1~9 分别为进气调节阀、加热器、进口测量段、进口扩压段、燃烧室、出口测量段、出口测压段、背压阀、排气段。

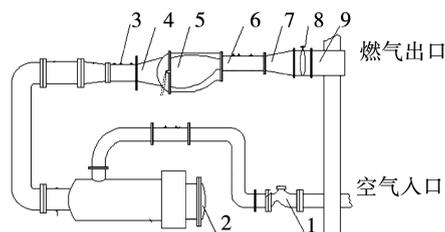


图 1 燃烧室试验系统框图

Fig. 1 Structure diagram of combustor test system

燃烧室试验系统主要包括空气系统、燃料系统、试验段及测试系统和冷却系统。其中主要测量设备包括计量空气流量的孔板流量计,误差不大于 1%; 计量质量流量计的气体燃料流量,误差不大于 0.5%; K 型单点热电偶,测量燃烧室进口温度,误差不大于 1%; 多点双铂铑热电偶,测量出口温度,误差不大于 1%; Testo350 烟气分析仪,测量燃气成份。

1.2 试验件

以带有预混室的单旋流贫预混燃烧室为研究对象,燃料采用天然气。头部进气经旋流器与燃料掺混后进入火焰筒燃烧,筒身前部设冷却孔,后部设掺混孔。燃烧室结构如图 2 所示。图中 1~8 分别为天然气进口、预混燃料喷杆、旋流器、预混室、火焰筒、掺混空气、值班燃料喷口、燃烧空气。

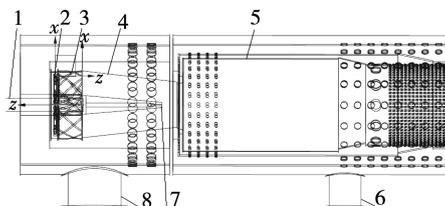


图 2 燃烧室结构简图

Fig. 2 Combustor geometric model

燃料采用天然气,分为主燃级燃料和值班级燃料。主燃级燃料占总燃料量的 95%,由天然气进口进入,预混燃料喷杆喷出,经轴向旋流器与空气混合,并在预混室中继续掺混,进入火焰筒预混燃烧。值班级燃料占总燃料量 5%,由天然气进口进入,由值班燃料喷口轴向喷出,进入火焰筒进行扩散燃烧。燃烧室主要部件如图 3 所示。试验件组合如表 1 所示。

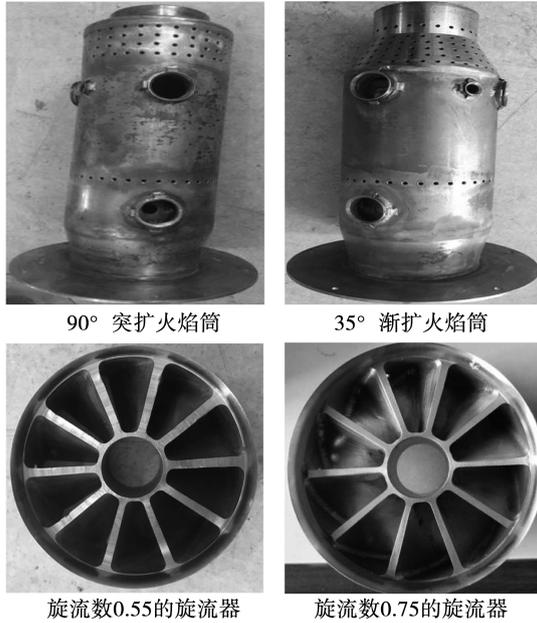


图 3 燃烧室主要部件

Fig. 3 Main components of combustor

表 1 试验件组合

Tab. 1 Types of test piece combination

组合	扩张角/(°)	旋流数
A	90	0.55
B	90	0.75
C	35	0.55
D	35	0.75

2 试验与结果分析

2.1 总压损失

总压损失一般用总压恢复系数 σ 来描述:

$$\sigma = \frac{p_2^*}{p_1^*} \quad (1)$$

式中: p_1^* —进口总压,Pa; p_2^* —出口总压,Pa。

试验中进口布置 3 支单点总压探头,出口布置

3 支三点总压探头,分别取平均值作为进、出口总压。试验研究了不同进口马赫数下各组合总压损失。燃烧试验台如图 4 所示。试验工况如表 2 所示。试验结果如图 5 所示。



图 4 燃烧试验台

Fig. 4 Combustion test rig

表 2 总压损失试验工况

Tab. 2 Total pressure loss test condition

组合	进口总温/K	进口总压/MPa	进口马赫数
A	288	0.303	0.12
B	288	0.303	0.15
C	288	0.303	0.18
D	288	0.303	0.21

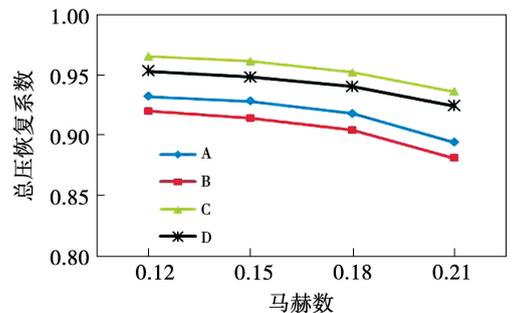


图 5 不同组合总压恢复系数随马赫数变化曲线

Fig. 5 Variation curves of total pressure recovery coefficient with Mach number in different combinations

由图 5 可以看出,随进口马赫数的增加,总压恢复系数逐渐降低,即总压损失逐渐增加。在两种旋流数下,组合 A,B 总压恢复系数均小于 C,D 组合,说明由于流动突然扩张转弯带来的旋涡、碰撞使速度场剧烈变化,导致突扩型火焰筒总压损失系数增大大约 3.4%~4.4%,且高马赫数时这种差别有增大趋势;对于 35° 渐扩型火焰筒的组合 C,D,匹配较小旋流数的组合 C 具有更高的总压恢复系数,损失较小,说明较大旋流数可能增大回流区,利于稳定燃

烧,但同时总压损失系数约增加 1.3%。

2.2 贫油熄火

贫油熄火极限是燃烧稳定性的重要指标之一,在进口总温、总压保持不变的情况下,逐步降低主燃级燃料流量获得贫油熄火边界。燃料流量降低 5 s 内,燃烧室进、出口温升低于 80 K,以此作为熄火判定依据。本文研究了不同进口马赫数下的贫油熄火油气比,试验工况如表 3 所示。贫油熄火试验结果如图 6 所示。

表 3 贫油熄火工况

Tab.3 Lean oil flameout test condition

组合	进口总温/K	进口总压/MPa	马赫数
A	650	0.303	0.12
B	650	0.303	0.15
C	650	0.303	0.18
D	650	0.303	0.21

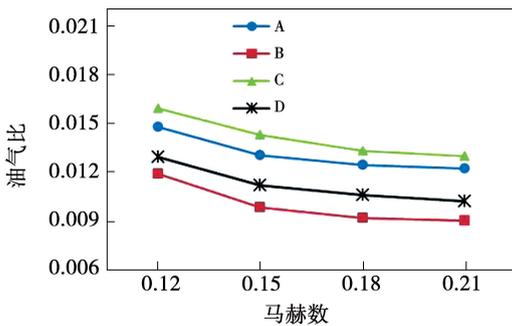


图 6 不同组合贫油熄火油气比随马赫数变化曲线

Fig.6 Variation curves of oil - gas ratio with Mach number for lean oil flameout in different combinations

由图 6 可以看出,贫油熄火油气比随进口马赫数的增加逐渐减小并趋于稳定。分析认为,在研究的马赫数范围内,过小的马赫数不利于火焰筒头部回流区的形成和稳定燃烧;随马赫数的增加,头部回流区更明显且区域更大,利于稳定燃烧,进而降低熄火油气比。同时,相同油气比下,随马赫数增加,增加扩散燃烧的值班级燃料量也利于稳定燃烧。而进一步增加马赫数,气流的吹熄效应增强,熄火油气比基本稳定。对比组合 A 和 B,对于 90°突扩火焰筒,旋流数由 0.55 增大到 0.75,最小熄火油气比由 0.012 减小到 0.009,说明较大旋流数具有更低的熄火油气比;对比组合 C 和 D,对于 35°渐扩型火焰筒,旋流数由 0.55 增大到 0.75,最小熄火油气比由

0.013 减小到 0.010,较大旋流数同样具有更低的熄火油气比。由此可见,无论是突扩型还是渐扩型火焰筒,较大旋流数均有利于形成较大头部回流区,拓宽熄火极限;各旋流数下,突扩型火焰筒均具有更低的贫油熄火极限。

2.3 出口温度场

燃烧室出口温度场是燃气轮机重要性能指标,直接影响功率及涡轮叶片运行安全及寿命。出口温度场指标主要包括平均温度 T_{4av} 、热点温度 T_{4max} 、温度分布系数 δ_{OTDF} 的表达式为:

$$\delta_{OTDF} = \frac{T_{4max} - T_{4av}}{T_{4av} - T_{3av}} \quad (2)$$

式中: T_{3av} —燃烧室进口平均温度,K。

试验采用气冷三点采样双铂铑高温热电偶耙进行温度测量,在燃烧室出口测量段周向均匀布置 6 支热电偶耙,共计 18 个取样点。热电偶耙及安装方式如图 7 所示。温度场试验工况如表 4 所示。温度场试验结果如表 5 所示。

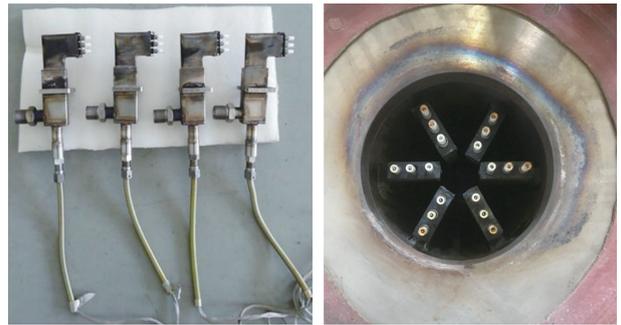


图 7 热电偶耙及安装方式

Fig.7 Thermocouple rake and installation mode

表 4 温度场试验工况

Tab.4 Temperature field test condition

空气总温 /K	空气总压/ MPa	天然气流量/ $g \cdot s^{-1}$	空气流量/ $kg \cdot s^{-1}$	
			头部	冷却
650	0.303	14.67	0.465	0.204

表 5 出口温度场试验结果

Tab.5 Outlet temperature field test results

组合	平均温度/K	热点温度/K	温度分布系数
A	1 424.2	1 528.0	0.134 1
B	1 422.1	1 531.4	0.141 6
C	1 415.1	1 531.4	0.152 0
D	1 422.4	1 527.2	0.135 7

为更具实用性,试验所用燃烧室形体结构及气流分配接近于实际燃烧室,因此温度分布系数均小于0.2,满足燃烧室设计标准。由表5可以看出,对于90°突扩型火焰筒,匹配较小旋流数(组合A)温度场均匀性更好;而35°渐扩型火焰筒则匹配较大旋流数(组合D)温度场均匀性更好。对比组合A, B, C, D发现,90°突扩型火焰筒,对于不同旋流数适应性较好,旋流数由0.55增大到0.75,温度分布系数由0.1341增大到0.1416,仅增加5.59%;而35°渐扩型火焰筒对于不同旋流数适应性较差,旋流数由0.75减小到0.55,温度分布系数由0.1357迅速增大到0.1520,增加12.0%。

2.4 污染物排放

燃气轮机排放的主要气态污染物成份为CO, UHC, NO_x以及可见冒烟。本文按照等面积取样原则设计了径向三点水冷取样耙,在燃烧室出口(位置同温度场热电偶布置)周向均布6支取样耙,共计18个取样点汇集至掺混总管后,采用Testo350烟气分析仪分析检测。采样耙及布置方式如图8所示。



图8 燃气采样耙及布置方式

Fig. 8 Gas sampling rake and arrangement mode

试验工况见表4。污染物排放指数试验结果如表6所示。污染物含量采用排放指数(EI)描述, EI定义为每燃烧1 kg燃料产生的污染物,单位为g/kg。

表6 污染物排放指数试验结果(g/kg)

Tab. 6 Emission index of pollutant test results(g/kg)

组合	CO	UHC	NO _x
A	26.23	12.55	0.609
B	21.73	10.93	0.783
C	18.87	9.21	0.850
D	18.02	8.14	0.962

由表6可以看出,对于CO和UHC排放,35°渐扩型火焰筒具有优势,两种旋流数下污染物排放指数均低于90°突扩型火焰筒;对于NO_x排放,90°突扩型火焰筒具有优势。这应该与不同污染物生成机理不同有关,CO和UHC主要因为局部低温缺氧燃烧不充分产生,而NO_x主要为高温下氮氧结合产生。说明90°突扩火焰筒掺混性更强,燃气混合相对更均匀,局部高温区更小,抑制了NO_x生成;而35°渐扩型火焰筒则相反,局部高温区较大,促进了充分燃烧,降低CO和UHC生成。

2.5 燃烧效率

燃烧效率主要通过温升法和燃气分析法获得,其中温升法受冷却换热、取样密度、热电偶精度影响较大,而燃气分析法虽然也存在类似问题,但影响相对较小,结果更稳定,因此本文使用燃气分析法完成效率测试。试验工况如表4所示。燃烧效率测试分析结果如表7所示。

表7 燃烧效率

Tab. 7 Combustion efficiency

组合	效率/%
A	0.9782
B	0.9815
C	0.9833
D	0.9866

由表7可以看出,90°突扩型火焰筒在两种旋流数下燃烧效率均略低于35°渐扩型火焰筒,这由污染物排放试验中渐扩型火焰筒CO和UHC排放指数略低也可预知。但4种组合燃烧效率变化不大,相同火焰筒型式下,旋流器对燃烧效率的影响约为0.34%~0.44%;相同旋流器下,不同火焰筒型式对效率燃烧影响约为0.52%~0.62%。

3 结论

本文以某贫预混燃烧室为研究对象,试验研究了不同火焰筒头部结构与旋流器匹配对燃烧性能的影响,得出结论:

(1) 渐扩型火焰筒总压损失系数较突扩型火焰筒减小约3.4%~4.4%,且匹配较小旋流数旋流器使燃烧室具有更高的总压恢复系数;

(2) 突扩型火焰筒较渐扩型火焰筒具有更低的

贫油熄火极限,且无论突扩型还是渐扩型火焰筒,匹配较大旋流数旋流器使燃烧室具有更低的熄火极限;

(3) 突扩型火焰筒温度场对旋流器适应性好,易获得均匀温度场;渐扩型火焰筒对旋流器适应性差,但匹配合适的旋流器,仍可获得较均匀温度场;

(4) 突扩型火焰筒在 NO_x 排放上具有优势,且匹配小旋流数旋流器 NO_x 排放更低;渐扩型火焰筒在 CO 和 UHC 排放上具有优势,且匹配大旋流数旋流器 CO 和 UHC 排放更低;

(5) 各组合燃烧效率相差不大,渐扩型火焰筒匹配较大旋流器时燃烧效率相对最大。

参考文献:

- [1] ZOU Bo-wen, XU Quan-hong, CAO Wen-yu, et al. Lean blowout mechanism of coupled recirculation zone in concentric staged combustor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28 (8): 1759 - 1763.
- [2] 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, 23(6): 986 - 996.
- ZHAO Jian-xing. Pollutant emission and development of low-emission combustion technology for civil aero engine [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(6): 986 - 996.
- [3] YI Tong-xun, GUTMARK E. Lean blowout features and control in a swirl-stabilized, partially premixed gas turbine combustor [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006.
- [4] PLESSING T, KORTACHIK C, PETERS N, et al. Measurements of the turbulent burning velocity and the structure of premixed flames on a low-swirl burner [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(1): 359 - 366.
- [5] POLIKE W, FISCHER A, SATTELMAYER T. Instability of a premix burner with nonmonotonic pressure drop characteristic [J]. *Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, 125(1): 20 - 27.
- [6] DINESH K K J R, JENKINS K W, SAVILL A M, et al. Swirl effects on external intermittency in turbulent jets [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2012, 33(1): 193 - 206.
- [7] SAEDIAMIRI M, BIROUK M, KOZINSKI J A. On the stability of a turbulent non-premixed biogas flame: effect of low swirl strength [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161: 1326 - 1336.
- [8] 李苏辉, 张归华, 吴玉新. 面向未来燃气轮机的先进燃烧技术综述 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*. 2021, 61(12): 1423 - 1437.
- LI Su-hui, ZHANG Gui-hua, WU Yu-xin. Advanced combustion technologies for future gas turbines [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*: 2021, 61(12): 1423 - 1437.
- [9] 刘 静, 肇俊武. 国外民用航空发动机低污染燃烧室的发展 [J]. *航空发动机*, 2012, 38(4): 11 - 16.
- LIU Jing, ZHAO Jun-wu. Development of low emission combustor for foreign civil aeroengine [J]. *Aeroengine*, 2012, 38(4): 11 - 16.
- [10] 张中飞, 王成军, 佟 飞, 等. 旋流器结构对中心分级燃烧室贫油熄火影响数值模拟 [J]. *热力发电*, 2018, 47(4): 70 - 78.
- ZHANG Zhong-fei, WANG Cheng-jun, TONG Fei, et al. Effect of swirler structure on lean blow-out of central staged combustor: numerical simulation [J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(4): 70 - 78.
- [11] 付忠广, 王瑞欣, 石 黎, 等. 旋流器通道宽度对旋流预混燃烧特性影响数值模拟 [J]. *热力发电*, 2018, 47(2): 63 - 70.
- FU Zhong-guang, WANG Rui-xin, SHI Li, et al. Effect of cyclone channel width on swirling premixed combustion: numerical simulation [J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(2): 63 - 70.
- [12] 刘 凯, 李之予, 曾 文, 等. 径向分级低污染燃烧室燃烧性能试验 [J]. *热力发电*, 2019, 48(8): 22 - 26.
- LIU Kai, LI Zhi-yu, ZENG Wen, et al. Experimental study on combustion performance of radial-staged low emissions natural gas combustor [J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(8): 22 - 26.
- [13] YELLUGARI K, GOMEZ R V, GUTMARK E J. Effects of swirl number and central rod on flow in lean premixed swirl combustor [C]//AIAA Scitech 2020 Forum, 2020.
- [14] MYERS G, CARDENAS M, REYNOLDS B, et al. The effect of primary zone design on the performance of a high heat release rate propulsion engine combustor [C]//Houston, Texas: International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, 1995.
- [15] REDDY K S, REDDY D N. Experimental and numerical investigations of swirling flows in a reverse flow gas turbine combustor [C]//Miami, Florida: 37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2007.
- [16] 党新宪, 赵坚行, 徐 榕, 等. 试验研究旋流数对燃烧室气动性能的影响 [J]. *航空动力学报*, 2011, 26(1): 21 - 27.
- DANG Xin-xian, ZHAO Jian-xing, XU Rong, et al. Experimental investigation on effects of swirl number on aerodynamic characteristics of combustor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(1): 21 - 27.
- [17] 汤朝伟, 李建中, 金 武, 等. 主燃级旋流数影响三级旋流燃烧室流动与燃烧特性试验 [J]. *航空动力学报*, 2021, 36(3): 635 - 645.
- TANG Chao-wei, LI Jian-zhong, JIN Wu, et al. Experiment on effect of main swirl number on the flow and combustion characteristic of three-stage swirl combustor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(3): 635 - 645.
- [18] 刘爱斌, 李昱泽, 朱 涛, 等. 中心分级燃烧室旋流角变化对燃烧特性的影响变化对燃烧特性的影响 [J]. *热能动力工程*, 2019, 34(12): 16 - 23.
- LIU Ai-guo, LI Yu-ze, ZHU Tao, et al. Effect of central staged combustor swirl angle on combustion performance [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2019, 34(12): 16 - 23.