

双旋流燃烧室单头部油雾特性实验

金仁瀚, 刘 勇, 冯志鹏, 王锁芳

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了获得双旋流燃烧室油雾特性, 采用粒子图像测速仪(PIV)对其单头部油雾场进行测量. 通过实验, 获得了不同燃油流量分配、不同预燃级喷嘴位置对油雾特性的影响. 在实验设计工况下所得结果表明: ①直径约为 $80\mu\text{m}$ 处的油珠体积分数最大, 其他粒径的油珠体积分数都较小; ②随着燃油流量增加, 单开预燃级喷嘴时燃油雾化变差, 单开主燃级喷嘴时雾化质量相差不大; ③预燃级喷嘴位于旋流器出口处有助于改善燃油的雾化质量; ④同时打开主燃级和预燃级喷嘴时, 保持油气比不变, 随着主燃级供油流量增加, 雾化质量得到改善.

关 键 词: 双旋流燃烧室; 油雾场; 油珠粒径; 离心式喷嘴; 粒子图像测速仪

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Experiment on spray characteristic of single head of dual-swirl cup combustor

JIN Ren-han, LIU Yong, FENG Zhi-peng, WANG Suo-fang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to obtain fuel spray characteristics of dual-swirl cup combustor, the particle image velocimetry (PIV) was applied to measure the spray field of its single head. Through the experiment, the fuel spray characteristics were obtained with different fuel flow distributions and locations of the pilot atomizer. Under the experimental conditions, the results show that: (1) Volume fraction of the droplet size of $80\mu\text{m}$ is the largest, while volume fraction of the other droplet sizes not equal to $80\mu\text{m}$ decreases sharply. (2) When the fuel flow increase, the spray quality deteriorates with only pilot fuel atomizer available, and differs little with only primary atomizer available. (3) The fuel spray field of pilot fuel atomizer at swirler outlet has better performance than that of pilot atomizer at throat position. (4) When the pilot and primary fuel atomizer operate at the same time, atomization quality is improved with increase of primary fuel flow rate while inlet fuel air ratio is kept unchanged.

Key words: dual-swirl cup combustor; spray field; particle diameter; centrifugal nozzle; particle image velocimetry (PIV)

随着航空燃气轮机整体性能要求的提高, 航空发动机的污染问题引起了广泛关注. 低污染燃烧技术在国内外都被进行了广泛的研究, 先后对多种低污染燃烧室进行了研究, 主要有: 变几何燃

烧室、催化燃烧室、分级燃烧室、贫油预混预蒸发燃烧室、富油燃烧/淬熄/贫油燃烧燃烧室、双环预混旋流燃烧室, 以及陶瓷基复合材料燃烧室等. 为了满足当今航空发动机的发展趋势, 低污染燃烧

技术研究对发展我国航空事业具有十分重要的意义^[1-4]。

燃烧室内燃油的雾化过程和雾化质量直接影响燃油的燃烧效率、燃烧室的温度分布、航空发动机的污染物排放。双旋流结构头部对燃油的雾化质量有着极其重要的影响,为此不少国内外学者对其形成的流场、油雾场进行了研究。文献[5]综述了现代燃烧室广泛使用的双旋流空气雾化喷嘴的关键设计参数以及工况对装该种喷嘴的燃烧室性能的影响。文献[6-10]对GE公司的CFM56双旋流结构头部进行了一系列研究,主要研究了文氏管的有无、几何缩放比例及套筒形式对流场、喷嘴张角和流场结构的影响。文献[11]运用校准的五孔探针测定双旋流空气雾化喷嘴中同向与反向旋转的双旋流器产生的流场,对所产生的流场进行了比较分析。文献[12]采用马尔文激光测雾仪对一种直射式供油的双旋流空气雾化喷嘴的喷雾性进行了研究,得出了SMD(索太尔平均直径)及分布指数与气液比的关系。文献[13]分别利用PDPA(相位多普勒粒子分析仪)与LDA(laser Doppler anemometry)测量气流的速度分布及油珠的速度、尺寸分布,实验研究了装有单级轴向旋流器的燃烧室内油雾的燃烧流场。邢小军等^[14]利用PDA(phase Doppler analyzer)对模型燃烧室的喷雾场进行了测量,研究了喷雾压力、旋流器对喷雾场的影响。

本文运用PIV对某贫油双旋流结构的燃烧室单头部油雾特性进行了测量,实验研究了燃油流量分配及预燃级喷嘴位置改变对燃油雾化质量的影响。

1 实验装置及测量方法

1.1 实验系统

实验系统由油路和气路组成(图1)。冷空气经压气机、电加热器后,转变为实验设计工况点所要求的热态压缩气流。燃油经主、副油泵后,经由预燃级喷嘴和主燃级喷嘴进入实验测量区域,燃油雾化产生的油珠作为实验的测量对象。

1.2 实验头部

该头部预燃级旋流器由一个离心喷嘴与一个围绕在其周围的带有14个叶片的轴向旋流器组成;主燃级旋流器装有一个带有24个叶片的径向旋流器和24个喷嘴组成,喷嘴位于叶片下方的通道内均匀布置(图2)。

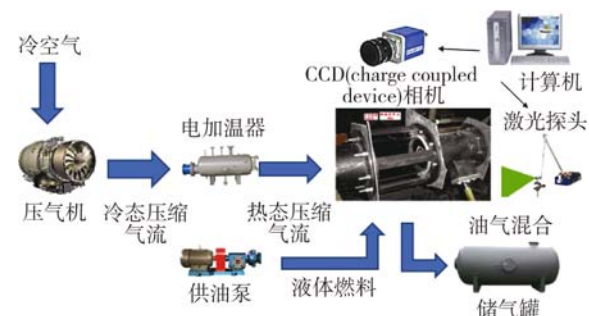


图1 PIV测量油雾场实验系统图

Fig. 1 Experimental system of PIV measure spray field

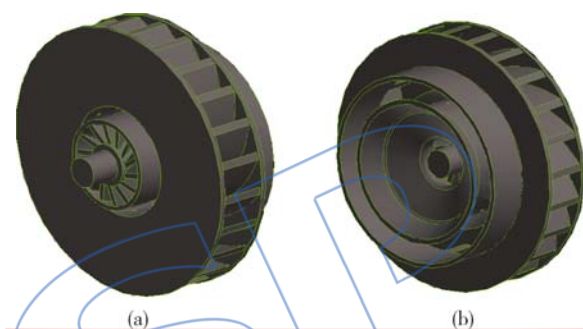


图2 双旋流头部实物图

Fig. 2 Photograph of dual-swirl head

1.3 燃烧室油雾场测量

实验过程中,在旋流器出口处,燃油主要以油膜的形式,油膜对激光的反射作用较强,PIV测得油雾场的数据不理想,对油珠颗粒的区分度不高,因此实验时取距旋流器出口一定距离的80 mm×80 mm区域作为实验数据采集区。由于受PIV相机像素限制,为了提高油珠的分辨率,更细致地了解油珠颗粒分布,实验中将测量区域分为四部分进行测量(如图3所示)。

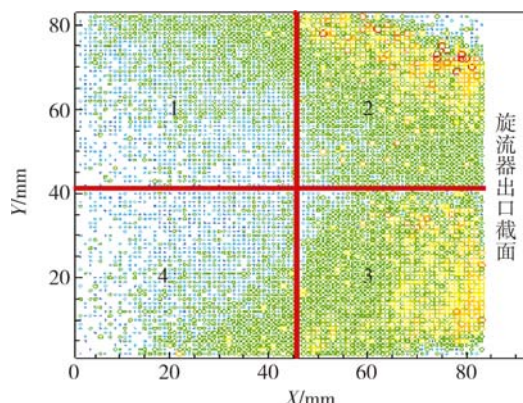


图3 油雾场测量分区示意图

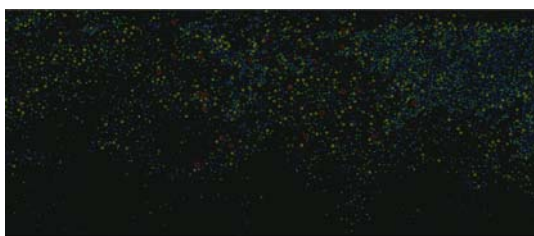
Fig. 3 Schematic of measured zones of the spray field

1.4 数据处理方法

对 PIV 获得的测量区域原始油雾场图像(图 4(a))进行一系列的数字图像处理^[15],获得油珠粒径分布图像(图 4(b)).为了获得得到油珠的数目、平均直径,油珠的粒径数目分布及油珠体积分布,将相同工况下的油珠颗粒分布图进行统计平均.



(a) 油珠分布原始数字图像



(b) 数字图像处理不同粒径油珠分布图

图 4 颗粒尺寸分布处理方法

Fig. 4 Treatment of distribution of particle size

2 实验结果及分析

2.1 单开预燃级喷嘴时油雾特性分析

当关闭主燃油路,单开预燃级喷嘴,进口空气流量为 0.130 kg/s ,进口温度为 473 K 时,实验研究不同预燃级喷嘴位置和燃油流量对油雾场的影响,实验工况如表 1 所示.

表 1 单开预燃级喷嘴实验工况

Table 1 Operating cases of only pilot fuel atomizer

工况	喷嘴位置	进口总压 p/MPa	进口总温 T/K	预燃级喷嘴 燃油流量/ (g/s)
1	旋流器出口	0.1087	473	1.014
2	喉道处	0.1087	473	0.507
3	喉道处	0.1087	473	1.014
4	喉道处	0.1087	473	1.69

图 5~图 9 分别为工况 2、工况 3 和工况 4 时油雾特性. 图 5、图 6 分别为燃烧室中心截面上油珠数目与 SMD 的轴向分布. 由图可知,在靠近旋流器出口区域油珠的数目最多且 SMD 也较大,

随着轴向距离增加,油珠在热气流的作用下不断蒸发,油珠数目、粒径不断减少;随着预燃级燃油量的增加,油珠数目增加,油珠 SMD 也变大,油雾场中油珠的细度变大,雾化质量变差.

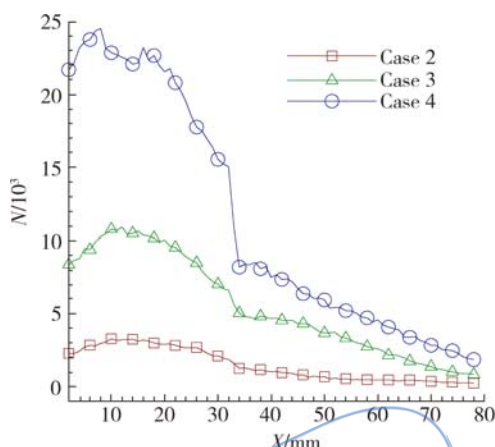


图 5 不同燃油流量时油珠数目轴向分布
(工况 2、工况 3、工况 4)

Fig. 5 Axial distributions of droplet number with different fuel flow rates (case 2, case 3, case 4)

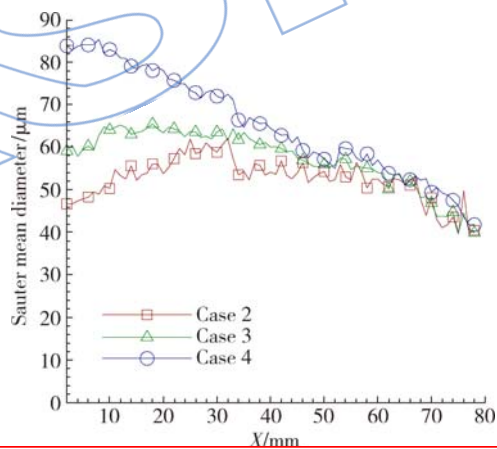


图 6 不同燃油流量时油珠 SMD 轴向分布
(工况 2、工况 3、工况 4)

Fig. 6 Axial distributions of droplet SMD with different fuel flow rates (case 2, case 3, case 4)

图 7 为燃烧室中心截面上不同粒径油珠数目分布. 由图可知,绝大部分的油珠直径 D 约为 $40 \mu\text{m}$,随着油珠粒径变小或加大,油珠数目急剧减小;不同供油量下油珠粒径分布规律基本相似,但随着燃油流量增加,油珠数目逐渐增加.

图 8 为燃烧室中心截面上不同粒径油珠体积分数分布,该图表示不同粒径下的油珠体积与整个测量区域内所有油珠体积的比值. 由图可知,油珠体积分数随着液滴直径的增加呈先增加后减小的变化趋势,油珠粒径 D 约为 $80 \mu\text{m}$ 处的油珠体

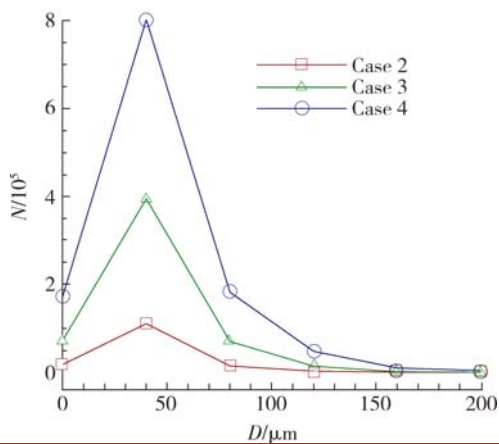


图7 不同燃油流量时油珠数目分布
(工况2、工况3、工况4)

Fig. 7 Distributions of droplet number with different fuel flow rates (case 2, case 3, case 4)

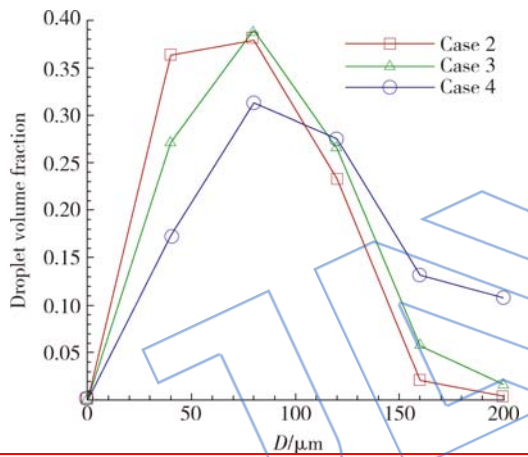


图8 不同燃油流量时油珠体积分数分布
(工况2、工况3、工况4)

Fig. 8 Distributions of droplet volume fraction with different fuel flow rates (case 2, case 3, case 4)

积分数最大.随着燃油流量的减小,小油珠所占的体积分数增加,大油珠所占的体积分数减小,说明了随着燃油流量的减少,小尺寸油珠所占比例增加,有助于提高燃油的雾化质量.

图9为燃烧室中心截面上不同油珠体积分数累积分布,油珠体积分数累积分布是指油珠直径小于某直径的所有油珠的体积占油珠总体积的分数,曲线的变化趋势反应了液滴分布均匀性的好坏.由图可知,随着油珠粒径逐渐增加,油珠体积分数累积越来越大,当油珠粒径接近 $200\mu\text{m}$ 时,油珠体积分数累积接近1,说明粒径超过 $200\mu\text{m}$ 的油珠很少.同时由图可知,随着油量的增加,油珠体积分数累积分布曲线变化趋势逐渐变得平坦,油珠尺寸分布的均匀性变差.

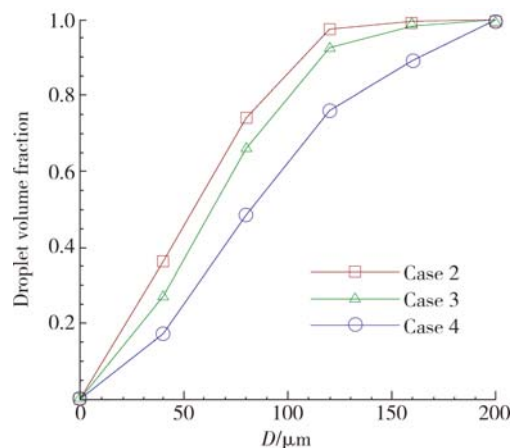


图9 不同燃油流量时油珠体积分数累积分布
(工况2、工况3、工况4)

Fig. 9 Distributions of droplet volume fraction accumulation with different fuel flow rates (case 2, case 3, case 4)

综上所述,随着预燃级喷嘴燃油流量的增加,小尺寸油珠的百分比减少,油雾场油珠细度增加,且油珠分布的均匀性变差,雾化质量变差.

图10~图14分别为相同燃油流量下预燃级喷嘴位于旋流器出口处与喉道处的油雾特性.由图10和图11可知,燃油流量相同时,预燃级喷嘴位于旋流器出口处形成的油雾场中油珠数目远远少于位于喉道处的.燃油流量相同,油珠数目越少,说明油珠的蒸发量就越大,燃油由液相转变为气相的速度就越快.燃油的雾化是要为后来的气化创造条件的,燃油蒸发的速度越快,说明所形成的油雾场就越有利于油珠的气化,雾化质量也就越好.

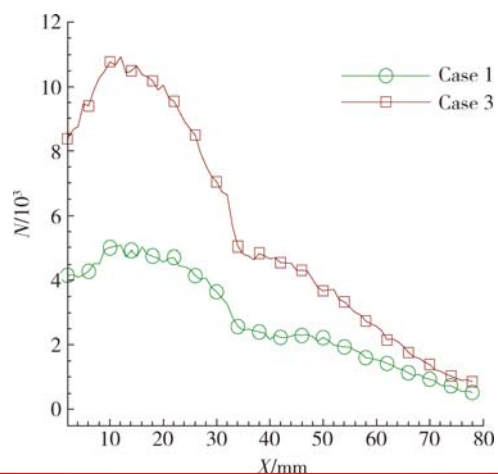


图10 不同喷嘴位置时油珠数目轴向分布
(工况1、工况3)

Fig. 10 Axial distributions of droplet number at different atomizer positions (case 1, case 3)

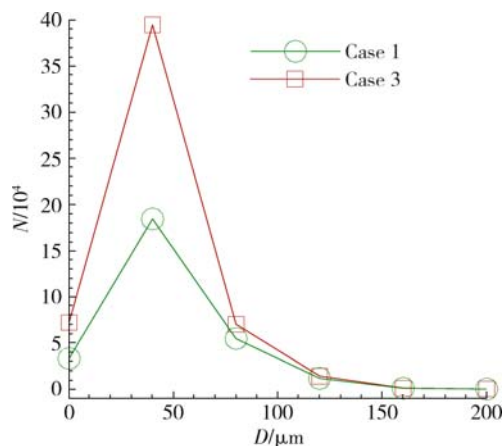


图 11 不同喷嘴位置时油珠数目分布(工况 1、工况 3)
Fig. 11 Distributions of droplet number at different atomizer positions (case 1, case 3)

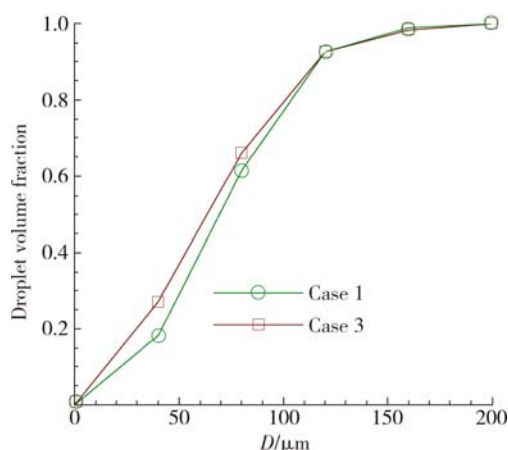


图 14 不同喷嘴位置时油珠体积分数累积分布
(工况 1、工况 3)
Fig. 14 Distributions of droplet volume fraction accumulation at different atomizer positions (case 1, case 3)

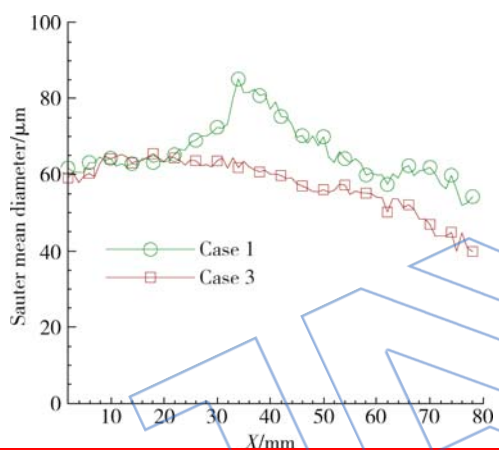


图 12 不同喷嘴位置时油珠 SMD 轴向分布
(工况 1、工况 3)
Fig. 12 Axial distributions of droplet SMD at different atomizer positions (case 1, case 3)

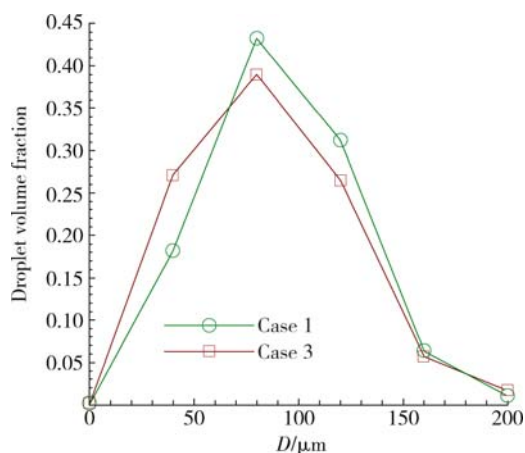


图 13 不同喷嘴位置时油珠体积分数分布
(工况 1、工况 3)
Fig. 13 Distributions of droplet volume fraction at different atomizer positions (case 1, case 3)

由图 12 可知,预燃级喷嘴位于喉道处油珠的 SMD 比位于旋流器出口的小,油雾场中油珠的细度较小.由图 13 和图 14 可知,预燃级喷嘴位于喉道时在测量区域内形成的油雾场中小尺寸油珠数量占油珠总量的比例大于预燃级喷嘴位于旋流器出口时的,但油雾场的均匀性却较差.

上述油雾特性的不同是由于预燃级喷嘴位置不同使得雾化方式发生改变及高温气流对油珠的蒸发效应共同决定的.如图 15 所示为预燃级喷嘴位于旋流器出口处燃油雾化过程.燃油在喷嘴的供油压力作用下进行一次雾化,由内旋流器所产生的气流带动向前流动,在文氏管内表面形成油膜,在文氏管出口处,油膜在内外旋流器形成的两股气流的剪切作用下进行二次雾化,破碎成粒径很小的油滴颗粒进入燃烧室.燃油的雾化方式发生了转变,由离心喷嘴出口的压力雾化方式在文

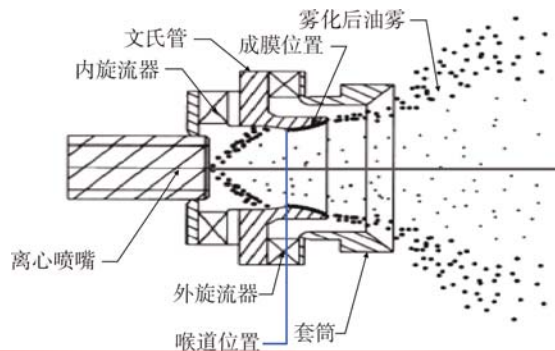


图 15 预燃级喷嘴位于旋流器出口时雾化过程
Fig. 15 Atomization process of pilot fuel atomizer at exit of swirler

氏管出口处转变为空气雾化方式. 当预燃级喷嘴位于喉道处时, 由喷嘴喷射出的燃油不可能在文氏管内壁面形成油膜, 喷嘴的雾化形式仍属于压力雾化. 在本实验工况下, 气、液相对速度较大, 雾化方式的转变有助于改善燃油的雾化质量, 使得预燃级喷嘴位于旋流器出口处形成的油雾场更易于油珠蒸发. 所以在实验测量范围内, 预燃级喷嘴位于旋流器出口时所形成的油雾场中油珠数量远远小于预燃级喷嘴位于喉道处的, 且小尺寸油珠所占比例也相对较低, 油雾场的细度较差.

综上所述, 预燃级喷嘴位于旋流器出口处形成的油雾场与位于喉道处的油雾场相比, 油珠颗粒更容易被蒸发, 颗粒分布的均匀性更好, 但较多的小尺寸油珠被蒸发完全, 从而使得细度较大、小尺寸油珠所占比例比较小. 综合油雾特性的比较结果, 预燃级喷嘴位于旋流器出口处较位于喉道处更有利于改善燃油的雾化质量.

2.2 单开主燃级喷嘴时油雾特性分析

当关闭预燃级喷嘴, 单开主燃级喷嘴时, 进口空气流量为 0.113 kg/s , 进口温度为 473 K , 实验研究不同主燃级喷嘴燃油流量对油雾特性的影响, 实验工况如表 2 所示.

表 2 单开主燃级喷嘴实验工况

Table 2 Cases of only primary fuel atomizer operating

工况	进口总压 p/MPa	进口总温 T/K	主燃级燃油 流量/ (g/s)
5	0.10745	473	1.469
6	0.10745	473	2.057
7	0.10745	473	2.4973

图 16~图 20, 分别为工况 5、工况 6 和工况 7 时油雾特性. 由图 16~图 18 可看出, 随着供油量增加, 油珠的数目轴向分布、SMD 轴向分布、粒径分布的变化趋势与单开预燃级喷嘴时相似. 由图 19 和图 20 可知, 随着主燃级供油量增加, 油珠体积分分数分布、体积分分数累积分布差别不大, 说明了不同尺寸油珠占整个测量区域内所有油珠体积的百分比及油雾场均匀性随油量的增加变化不大.

综上所述, 单开主燃级喷嘴时, 油珠的细度随供油量的减小稍有减小, 油雾场的均匀性变化不大, 雾化质量相差不大.

由上述比较还可以发现, 主燃级、预燃级喷嘴油量的改变对雾化质量影响程度存在较大差异. 主燃级油路是由 24 个独立的喷口组成, 主燃级油

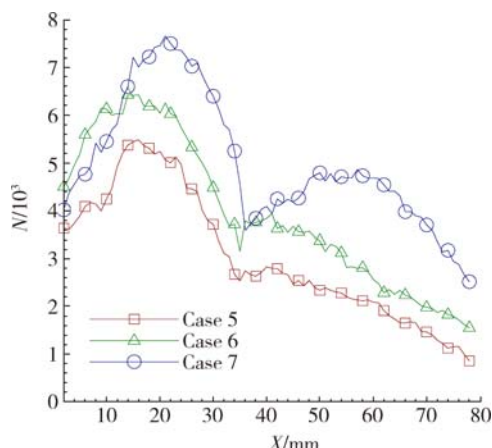


图 16 不同燃油流量时油珠数目轴向分布
(工况 5、工况 6、工况 7)

Fig. 16 Axial distributions of droplet number with different fuel flow rates (case 5, case 6, case 7)

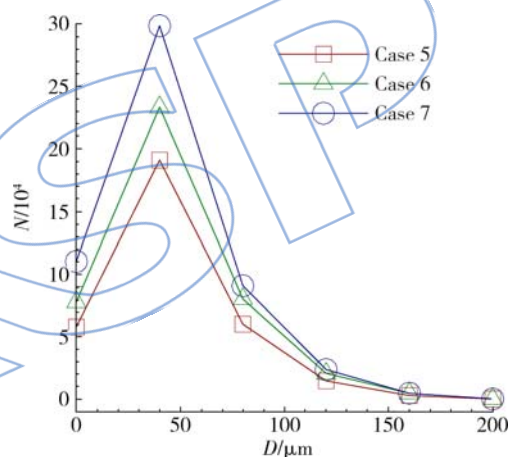


图 17 不同燃油流量时油珠数目分布
(工况 5、工况 6、工况 7)

Fig. 17 Distributions of droplet number with different fuel flow rates (case 5, case 6, case 7)

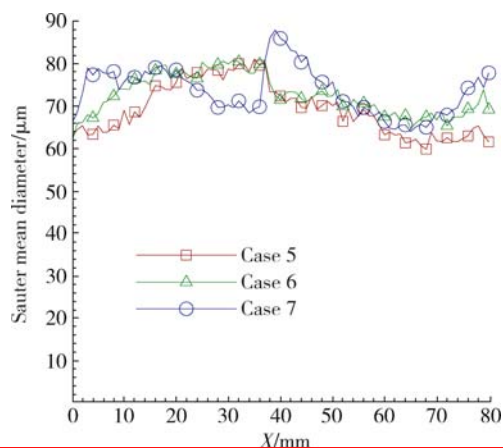


图 18 不同燃油流量时油珠 SMD 轴向分布
(工况 5、工况 6、工况 7)

Fig. 18 Axial distributions of droplet SMD with different fuel flow rates (case 5, case 6, case 7)

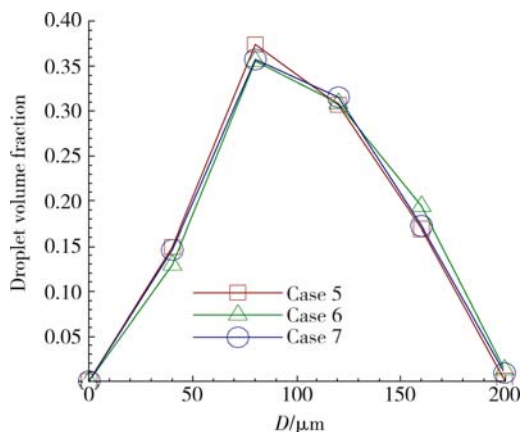


图 19 不同燃油流量时油珠体积分数分布
(工况 5、工况 6、工况 7)

Fig. 19 Distributions of droplet volume fraction with different fuel flow rates (case 5, case 6, case 7)

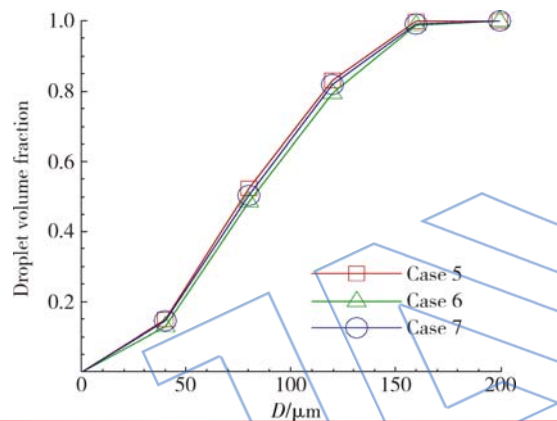


图 20 不同燃油流量时油珠体积分数累积分布
(工况 5、工况 6、工况 7)

Fig. 20 Distributions of droplet volume fraction accumulation with different fuel flow rates (case 5, case 6, case 7)

量增加对雾化质量的影响被分配到 24 个独立的喷口上,如此单个喷口的燃油增加量就显得较小,主燃级油量的增加对单喷孔的初次雾化受影响较小,从而使得在一定的油气比范围内实验测量区域中液滴的二次雾化质量随主燃级油量的增加改变较小.预燃级油路只有一个离心式喷嘴,预燃级油量增加对离心式喷嘴的初次雾化影响较大,进而使得在实验测量区域中液滴的二次雾化质量随预燃级油量的增加改变较大.

2.3 主燃级喷嘴与预燃级喷嘴同开时油雾特性结果分析

当主燃级喷嘴与预燃级喷嘴同时打开,进口空气流量为 0.130 kg/s,进气温度为 473 K,保持总油气比不变条件下,实验研究不同主燃级喷嘴

和预燃级喷嘴燃油流量分配对燃油雾化特性的影响,实验工况如表 3 所示.

图 21~图 25 分别为工况 8、工况 9 和工况 10 时燃油雾化特性.由图 21 和图 22 可看出,随着主燃级喷嘴供油量的增加,预燃级喷嘴供油量的减少,油珠数目减少,相同油珠粒径下的油珠数目减少.燃油流量相同,油珠数目越少,油珠的蒸发量就越大,燃油由液相转变为气相的速度就越快,说明了保持油气比不变,主燃级喷嘴供油量的增加,有助于提高油雾场中油珠的蒸发速度.从雾化目的方面考虑,越容易气化的油雾场,雾化质量越好.

表 3 主燃级喷嘴、预燃级喷嘴同时开启实验工况

Table 3 Case of primary and pilot fuel atomizer operating

工况	进口总压 p/MPa	进口总温 T/K	主燃级喷嘴燃油流量/ (g/s)	预燃级喷嘴燃油流量/ (g/s)
8	0.108 7	473	2.873	0.507
9	0.108 7	473	2.366	1.014
10	0.108 7	473	1.69	1.69

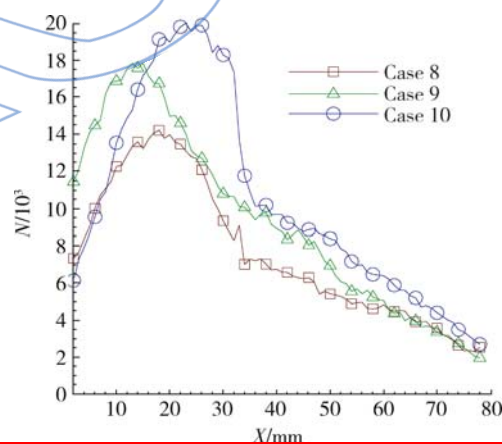


图 21 不同燃油流量分配时油珠数目轴向分布
(工况 8、工况 9、工况 10)

Fig. 21 Axial distributions of droplet number with different fuel allocations
(case 8, case 9, case 10)

由图 23 可知,油珠的 SMD 随主燃级喷嘴供油的增加而减小,油珠的细度得到了降低,雾化质量得到改善.由图 24 和图 25 可知,供油总量相等时随着主燃级供油量增加,小尺寸油珠所占比例稍有增加,油雾场均匀性得到改善.

综上所述,在油气比保持不变时,改变主燃级喷嘴和预燃级喷嘴燃油流量的分配,即主燃级喷嘴供油量增加,同时预燃级喷嘴供油量减少,油珠

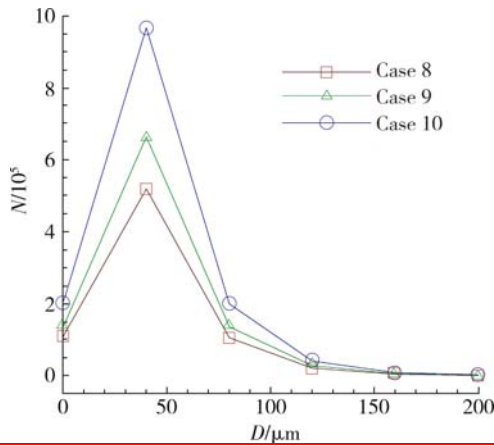


图 22 不同燃油流量分配时油珠数目分布
(工况 8、工况 9、工况 10)

Fig. 22 Distributions of droplet number with different fuel allocations (case 8, case 9, case 10)

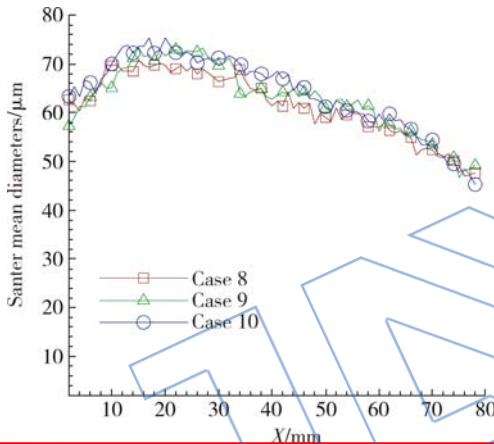


图 23 不同燃油流量分配时油珠 SMD 轴向分布
(工况 8、工况 9、工况 10)

Fig. 23 Axial distributions of droplet SMD with different fuel allocations (case 8, case 9, case 10)

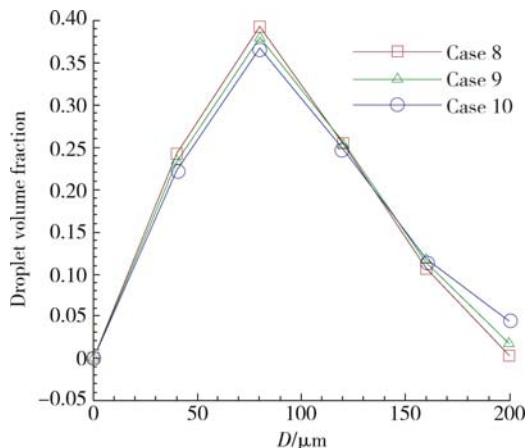


图 24 不同燃油流量分配时油珠体积分数分布
(工况 8、工况 9、工况 10)

Fig. 24 Distributions of droplet volume fraction with different fuel allocations (case 8, case 9, case 10)

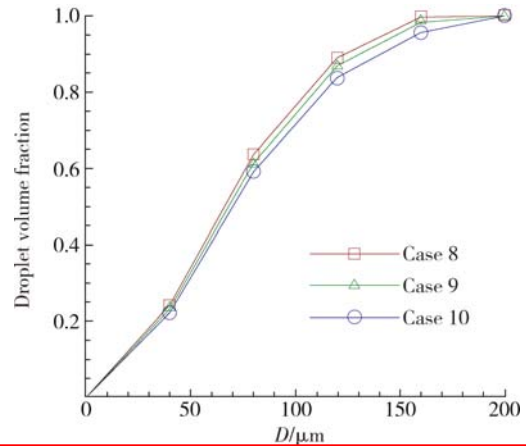


图 25 不同燃油流量分配时油珠体积分数累积分布
(工况 8、工况 9、工况 10)

Fig. 25 Distributions of droplet volume fraction accumulation with different fuel allocations
(case 8, case 9, case 10)

数目减少,燃油蒸发量增加,油雾场细度减小,均匀性变好,雾化质量得到改善。

3 结 论

本文利用 PIV 测量技术对双旋流燃烧室单头部油雾场进行实验研究,结果表明:

1) 在实验设计点工况下,直径约为 $80\mu\text{m}$ 处的油珠体积分数最大,其他直径下的油珠体积分数都较少。

2) 单开预燃级喷嘴时,随着供油量的增加,油珠的数量和 SMD 均逐渐增加,油雾场的均匀性指数减小,雾化质量变差;单开主燃级喷嘴时,油雾场的细度随供油量的减小稍有减小,油雾场的均匀性变化不大,雾化质量变化不明显。

3) 预燃级喷嘴位于旋流器出口处形成的油雾场与喉道处形成的油雾场相比,油珠数目较少,蒸发量较大,油珠尺寸分布的均匀性较好;小尺寸油珠所占比例较少,油雾场的细度较差。结合雾化的目的及油珠的蒸发特性考虑,预燃级喷嘴位于旋流器出口处有助于改善燃油的雾化质量。

4) 同时打开主燃级喷嘴和预燃级喷嘴时,保持油气比不变,随着主燃级喷嘴供油量增加,预燃级喷嘴供油量减少,油珠数目和 SMD 逐渐减少,燃油的气化速度增加,油雾场的均匀性变化不大。主燃级喷嘴油量的增加对燃油雾化特性影响不大,而预燃级喷嘴油量的增加对燃油雾化质量的恶化效果显著,所有当油气比不变时,预燃级喷嘴油量减小,燃油雾化质量得到改善。

以上所得双旋流燃烧室单头部油雾特性可以

为该燃烧室设计提供一定的参考依据。

参考文献:

- [1] 刘大响,金捷,彭友梅,等. 大型飞机的发展现状和关键技术分析[J]. 航空动力学报,2008,23(6):976-980.
LIU Daxiang, JIN Jie, PENG Youmei, et al. Summarization of development status and key technologies for large airplane engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6):976-980. (in Chinese)
- [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 Jianxing. Pollutant emission and development of low-emission combustion technology for civil aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6):986-996. (in Chinese)
- [3] 彭云晖,许全宏,张驰,等. 我国大飞机发动机低污染燃烧室发展考虑[C]//中国航空学会2007年学术年会动力专题论文集 0701-04-54. 深圳:中国航空学会动力分会,2007:69.
- [4] 尚守堂,程明,张军峰,等. 低排放长寿命燃烧室关键技术分析[C]//中国航空学会2007年学术年会动力专题论文集 0701-04-58. 深圳:中国航空学会动力分会,2007:70.
- [5] 彭云晖,林宇震,许全宏,等. 双旋流空气雾化喷嘴喷雾、流动和燃烧性能[J]. 航空学报,2008,29(1):1-14.
PENG Yunhui, LIN Yuzhen, XU Qianhong, et al. Atomization, aerodynamics and combustion performance of swirl cup[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(1):1-14. (in Chinese)
- [6] Ateshkadi A, McDonell V G, Samuelsen G S. Effect of mixer geometry on fuel spray distribution, emission and stability[R]. AIAA-98-0247, 1998.
- [7] Wang H Y, McDonell V G, Sowa W A, et al. Scaling of the two phase flow downstream of a gas turbine combustor swirl cup; Part I mean quantities[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(3):453-460.
- [8] Wang H Y, McDonell V G, Samuelsen G S. Influence of hardware design on the flow field structures and the patterns of droplet dispersion; Part I mean quantities[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 117(2):282-289.
- [9] Wang H Y, McDonell V G, Samuelsen G S. The influence of spray angle on the continuous and discrete phase flow field downstream of an engine combustor swirl cup[R]. AIAA-92-3231, 1992.
- [10] Wang H Y, McDonell V G, Samuelsen G S. Correlation on droplet behavior with gas-phase structures in a gas turbine combustor[R]. AIAA-93-1767, 1993.
- [11] 林宇震,刘高恩,王华芳. 反向与同向双旋流器流场的实验研究[J]. 航空动力学报,1995,10(4):423-425.
LIN Yuzhen, LIU Gaoen, WANG Huafang. An investigation of air flow field produced by a double-swirler airblast atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 1995, 10(4):423-425. (in Chinese)
- [12] 张驰,张荣伟,徐国强,等. 直射式双旋流空气雾化喷嘴的雾化效果[J]. 航空动力学报,2006,21(5):805-809.
ZHANG Chi, ZHANG Rongwei, XU Guoqiang, et al. Experimental investigation on atomization of an air-blast atomizer with plain-orifice nozzle and dual-swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(5):805-809. (in Chinese)
- [13] Bulzan D L. Velocity and drop size measurements in a confined, swirler-stabilized, combustor spray[R]. AIAA-96-3164, 1996.
- [14] 邢小军,徐行,郭志辉,等. 模型燃烧室冷态喷雾场实验研究[J]. 推进技术,2000,21(5):61-65.
XING Xiaojun, XU Hang, GUO Zhihui. Experimental study on spray field in combustor by phase doppler analyzer[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(5):61-65. (in Chinese)
- [15] 杨淑莹. VC++图像处理程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005.