

双级旋流器偏心对出口流场影响

胡 建¹, 郑婷婷², 胡好生¹, 蒋 尧¹, 刘 涛¹

- (1. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;
2. 中国航空发动机集团有限公司 湖南南方通用航空发动机有限公司, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 采用试验研究方法,以同一旋流器搭配不同尺寸出口限制域为对象,研究了双级旋流器偏心后,出口流场的变化规律。研究表明:当限制域边界尺寸(L)与旋流器特征尺寸(D)比值小于某个特定值时($L/D=3.3$),旋流器出口射流与壁面存在附着点,出口流场由收缩型变为扩张型;对收缩型流场,旋流器偏心对出口流场影响较大,尤其是径向速度场分布,由无偏心时的负值(小于 -4 m/s)增大至正值(大于 1 m/s);对扩张型出口流场,旋流器偏心几乎不影响出口轴向、径向速度的分布及大小,如中心线的轴线速度最小值均在 -4.4 m/s 附近,径向速度最小值均 -1 m/s ;进行旋流器设计时,通过减小出口限制域与旋流器特征尺寸比值的方式,使出口流场呈扩张型,可有效抑制旋流器偏心对出口流场的影响。

关 键 词: 双级旋流器; 限制域; 扩张型流场; 收缩型流场; 粒子图像测速仪
中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Double-swirler misalignment effect on outlet flow field

HU Jian¹, ZHENG Tingting², HU Haosheng¹,
JIANG Yao¹, LIU Tao¹

- (1. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;
2. Hunan South General Aviation Engine Limited Liability Company,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: The influence of hydrocyclone eccentricity on the outlet flow field was studied by experimental method when the same hydrocyclone was matched with different sizes of outlet limiting region. The results showed that when the ratio of the boundary size (L) to the characteristic size (D) of the hydrocyclone was less than a certain value ($L/D=3.3$), there was an attachment point between the jet at the outlet of the hydrocyclone and the wall of the hydrocyclone. The outlet flow field changed from contraction type to expansion type; for the contractile flow field, the eccentricity of the hydrocyclone had a great influence on the outlet flow field, especially the radial velocity field, the minimum value changed from -4 m/s to 1 m/s ; while for the expanding outlet flow field, the eccentricity of the hydrocyclone had little effect, for example, the minimum axial velocity was around -4.4 m/s , and the minimum radial velocity was -1 m/s . In order to reduce the influence of hydrocy-

收稿日期: 2019-12-25
基金项目: 航空基金(2014ZB08004); 湖南省科技计划项目(2018JJ3576)
作者简介: 胡建(1988—), 工程师, 硕士, 主要从事航空发动机燃烧室设计。

引用格式: 胡建, 郑婷婷, 胡好生, 等. 双级旋流器偏心对出口流场影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(7):1447-1456. HU Jian, ZHENG Tingting, HU Haosheng, et al. Double-swirler misalignment effect on outlet flow field[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(7):1447-1456.

clone eccentricity, the outlet flow field can be expanded by increasing the combined swirl number and reducing the ratio of the outlet limiting region to the characteristic dimension of the hydrocyclone.

Key words: double-swirler; limiting region; expansion field; contraction field; particle image velocimetry

双级旋流器主要由一级旋流器、二级旋流器、文氏管、套筒组成(见图 1),是航空发动机燃烧室重要组成部分,旋流器出口产生的高速旋转气流在火焰筒头部形成低压区,从而形成回流区以保证燃烧室稳定燃烧,同时旋流器产生的高速旋转气流还能改善燃油雾化、促进油气掺混以及调节出口温度场分布等。

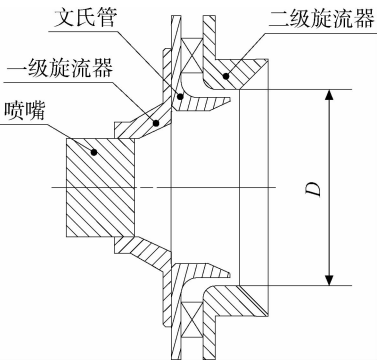


图 1 旋流器结构示意图

Fig. 1 Construction of double-swirler

国内外针对旋流器出口流场开展了大量的研究,文献[1-3]利用不同湍流模型数值分析了斜切孔式反向旋转双级旋流器下游的轴向、径向速度场和湍动能,并与激光多普勒流速仪试验结果进行对比,得出标准 $k-\epsilon$ 模型能较好地模拟出旋流器下游流场,所得结果与试验相比误差最小;文献[4]研究了旋流器下游限制域对流场的影响,结果表明中心回流区的轴向长度和大小与限制区域的尺度密切相关,限制域的通道尺寸与旋流器特征尺寸存在一个值使得中心回流区尺寸最大,没有限制域的大空间中回流区轴向长度最短;文献[5]采用粒子图像测速仪(PIV)实验方法,获得了旋流器出口的角涡、主回流区等流场特征;文献[6-8]采用计算和试验相结合,研究了出口限制域、进口边界对旋向不同双级径向旋流器的出口流场的影响;文献[9]研究了不同进气温度对冷、热态流场回流区的影响,得出燃烧后的热态流场,回流区长度较冷态流场更短;文献[10]从计算模型、设计思路等方面,对轴向、径向等多种类型旋

流器的结构及设计方法进行了深入的讲解;文献[11-12]针对旋流器结构参数对流场的影响做过深入的研究,综述了现代燃烧室广泛使用的双旋流器关键设计参数如文氏管、套筒结构、旋流数、套筒张角、文氏管与套筒的相对尺寸等对燃烧特性的影响,对旋流器的结构进行了系统的归纳与总结,为设计和应用该类结构的燃烧室提供参考。

国内外绝大多数针对旋流器的研究都是基于双级旋流器无偏心(中心线共线)的理想情况,事实上,工程加工的尺寸公差以及燃烧室工作时火焰筒头部受热不均皆会导致两级旋流器中心线不共线,即出现旋流器偏心。目前,国内外对旋流器偏心影响的研究较少。

国外方面,文献[13-15]对旋流器径向偏心的影响进行了实验研究,结果显示,燃油喷嘴的分布变差,雾化质量显著下降;文献[16]试验研究了某双级径向旋流器与喷嘴偏心对油雾场及燃烧室性能的影响,发现偏心距离较大时,能明显影响到油滴在燃烧室头部的分布,从而影响点火和燃烧稳定性、出口温度场及污染物排放等。国内方面,文献[17-18]研究了不同结构双级旋流器偏心对出口流场、油雾场影响,结果显示,旋流器偏心明显改变了出口流场的流动特性,中心区域不再呈对称分布的漩涡,同时,燃油雾滴的粒径及空间分布也不同程度受影响。

文献[19]通过分析不同结构旋流器试验结果得出,旋流器偏心对出口流场影响的大小还受一二级流量比、旋流器有效面积与文氏管喉部面积比(A_{es}/A_t)的影响,一二级流量比和 A_{es}/A_t 比值较大的旋流器,偏心对双级旋流器出口流场影响也较大。从文献[4]可知,旋流器下游流动限制域的尺寸对出口流场影响较大,当限制域的尺寸与旋流器特征尺寸大于或小于某一关键数值时,出口流场呈扩张型或收缩型结构(见图 2)。因此,本文以某斜切孔式双级旋流器为对象,通过与不同尺寸限制域匹配,试验研究不同出口流场形态下,旋流器偏心的影响大小,进一步查找出口流场受旋流器偏心影响的相关因素,为燃烧室工程设计提供参考。

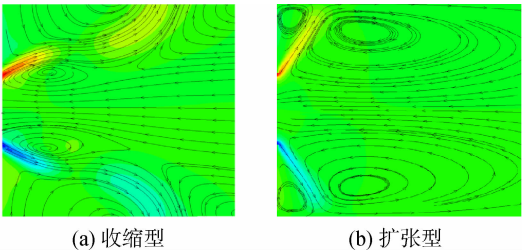


图 2 不同形态出口流场

Fig. 2 Different type of outlet flow field

1 试验方案

1.1 试验件及试验设备

试验装置见图 3 所示,包括斜切孔式双级旋流器、出口限制域(有机玻璃罩)、偏心垫片、进气段等组成,旋流器结构参数及限制域尺寸见表 1,其中出口限制域为正方形结构,边长为 L , D 为旋流器特征尺寸。

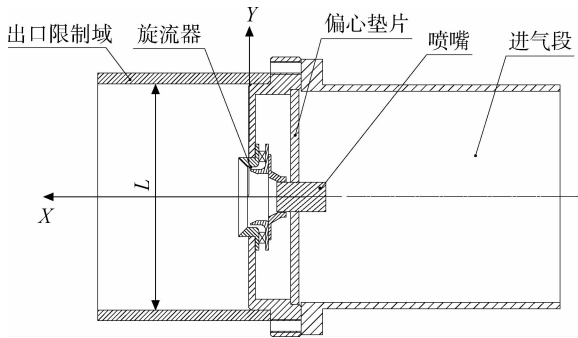


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Experimental facility of swirler

表 1 双级旋流器及限制域参数

Table 1 Parameters of swirler and boundary

旋流器及限制域	结构与尺寸
一级旋流器	斜孔式,孔数 8 个
二级旋流器	径向,叶片数 8 个
限制域尺寸(L/D)	2.5、2.9、3.3、3.8、4.2

试验中,二级旋流器固定在安装座,与出口限制域相对位置保持不变。一级旋流器通过喷嘴确定,喷嘴采用螺钉固定在偏心垫片上,通过换装不同的偏心垫片,即可实现喷嘴不同数值的径向偏心,从而实现一、二级旋流器偏心。限制域通过螺钉与二级旋流器安装座固定,可通过简单拆装更换,实现不同尺寸限制域的流场试验。

实验设备为德国 LaVision 公司的粒子图像

测量仪,主要包括激器、高速摄像机、控制系统、计算机等组成,见图 4。根据实验室的 PIV 测试经验,选用植物油为示踪粒子,粒径约 $1\sim5\mu\text{m}$,跟随性较好,满足实验精度要求(误差 3%内)。

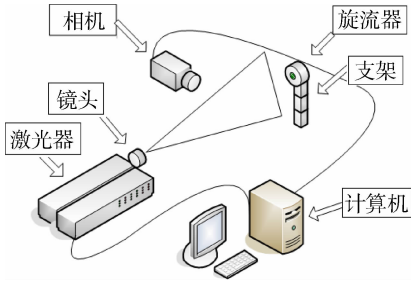


图 4 粒子图像测速仪装置图

Fig. 4 Experimental facility of PIV

1.2 试验内容

试验内容见表 2,试验件限制域的出口为大气环境。

表 2 试验内容

Table 2 Experimental schemes

方案	偏心量/mm	进口总温/K	进出口压差/Pa
1	0	293.15	2000
2	0.5		
3	1.0		
4	1.5		

2 试验结果及分析

2.1 地面抽吸试验结果分析

不同限制域下,过旋流器纵向截面轴向速度(V_x)云图如图 5 所示。从图中可知,出口回流区形态与限制域尺寸密切相关:

- 1) 当 $L/D > 3.3$ 时,旋流器出口射流并未直接接触及限制域壁面,而是往中心收缩,从而在壁面处形成较大尺寸的角涡,使得中心回流区尺寸较小,旋流器出口流场呈收缩型;
- 2) 当 $L/D \leq 3.3$ 时,旋流器出口射流直接在壁面附着,角涡受旋流器出口射流的压缩,尺寸较小,中心回流区以限制域为边界,尺寸大幅增大,出口流场呈扩张型。

根据图 5 结果可知,保持旋流器结构不变,通过与不同尺寸限制域搭配,测试旋流器不同偏心量的出口流场,分析收缩型或扩张型流场下,旋流器偏心对出口流场影响程度的大小,即可获取流

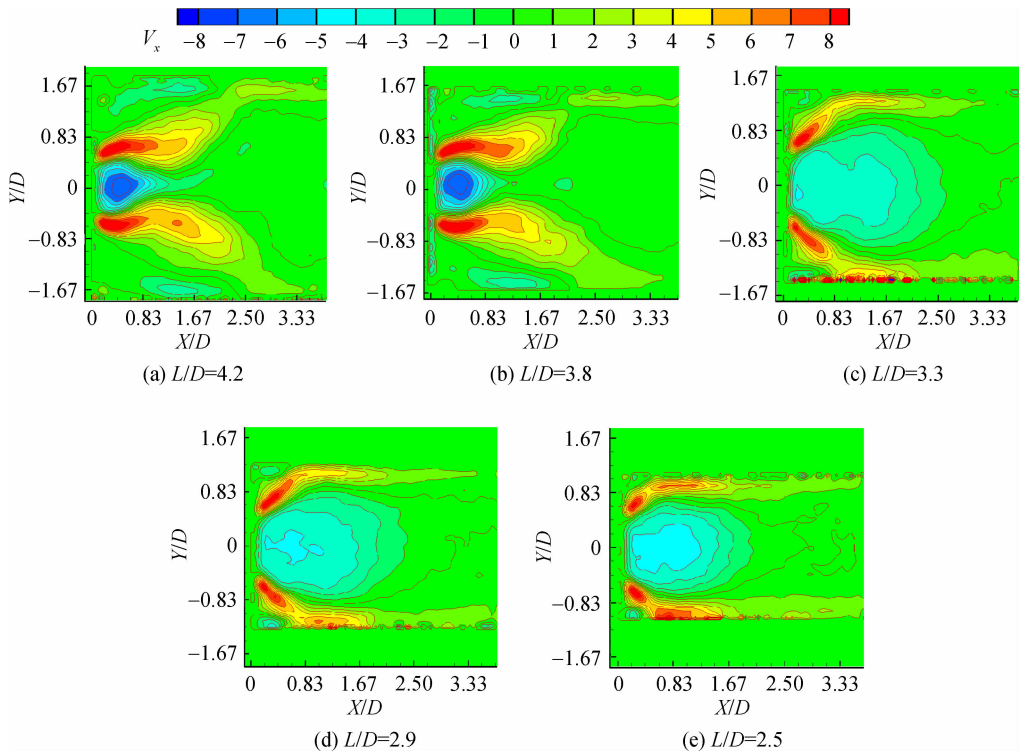


图 5 不同尺寸限制域时的出口流场(无偏心)

Fig. 5 Outlet flow field contours under different sizes of outlet limiting region (hydrocyclone centrality)

场形态与旋流器偏心对出口流场影响程度的相关性。

2.2 旋流器偏心对收缩型出口流场的影响

根据收缩型、扩张型不同方案的出口流场具有的相似性,从图 5 的 2 个收缩型、3 个扩张型方案中分别选取一方案,测试其不同偏心量下的出口流场,以探索偏心对该型流场的影响。

1) 纵截面轴向速度和径向速度分布

收缩型出口流场选取 $L/D=4.2$ 方案,其出口流场纵截面轴向速度云图(V_x)和径向速度云图(V_y)见图 6、图 7,从图 6 可以看出,旋流器无偏心时,出口射流形成一对收缩型漩涡,流场形态呈对称分布。随偏心量增大,流场的对称性受到轻微影响,如偏心 1.0 mm 时, $Y/D>0$ 方向的射流强度有所增加,回流区面积略微增大。但对比回流区的大小、形状可知,流场的形态基本不变。因此,对收缩型流场,出口轴向速度分布受偏心影响较小。

从图 7 可知,随着旋流器偏心量增加,沿偏心方向(Y 轴正向)的出口射流强度逐渐增加,当偏心量大于等于 1.0 mm 时,旋流器出口中心区域出现较大的正向速度,即旋流器出口射流出现往偏心方向流动的明显现象。因此,对收缩型流场,出口径向速度分布(V_y)受旋流器偏心的影响

较大。

2) 旋流器出口中心线的速度分布

图 8 为旋流器出口中心线的速度分布。从图 8(a)可看出,不同偏心量下,轴向速度的分布趋势接近,仅偏心量最大时(1.5 mm), $X/D=1.0$ 附近的速度值较高,从图 6 可知,这是因为偏心量 1.5 mm 时,回流区长度相比其他偏心状态略微减小,使得低速区的长度缩短,在 $X/D=1.0$ 的位置提前出现交汇射流,轴向速度值因此增大。

从中心线径向速度分布图可知,偏心量的增加导致径向速度值增大。偏心量小于 0.5 mm 时,径向速度分布趋势、峰值大小基本一致。当偏心量继续增大至 1.0 mm 后,径向速度峰值大幅增加,可知该方向射流强度急剧增大。从图 7 可看出,偏心量增加至 1.0 mm 后,出口下游径向速度沿 $Y/D>0$ 方向(旋流器偏心方向)大幅增加,流场变化较大。当 $X/D>1.5$ 后,不同偏心量的速度分布趋势开始汇集,旋流出口射流与外界流场逐步混合均匀,偏心的影响逐步减小,当 $X/D>2.5$ 后,速度场分布接近一致,偏心的影响基本消失。

3) 不同轴向位置横截面速度分量沿径向分布

不同偏心量下,不同轴向位置的轴向、径向速

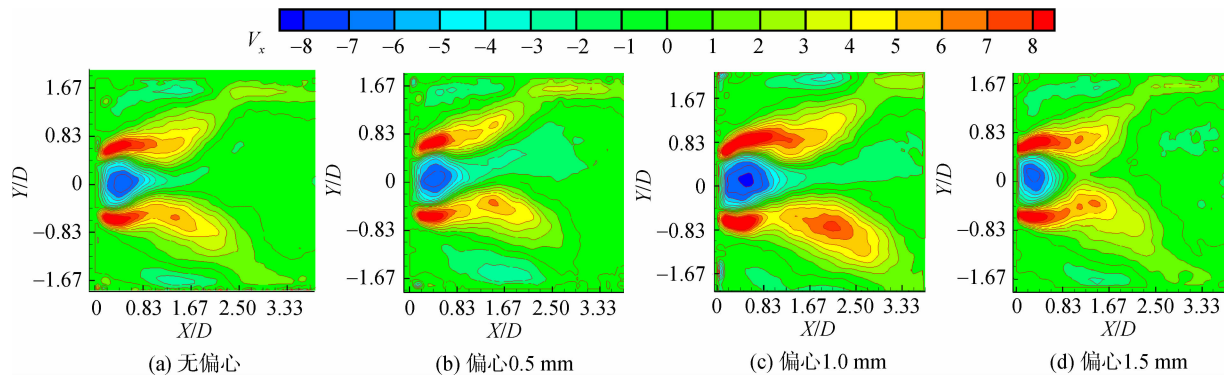


图 6 收缩型出口流场的纵截面轴向速度分布

Fig. 6 Axial velocity contours at cross-section plane of contraction type flow field

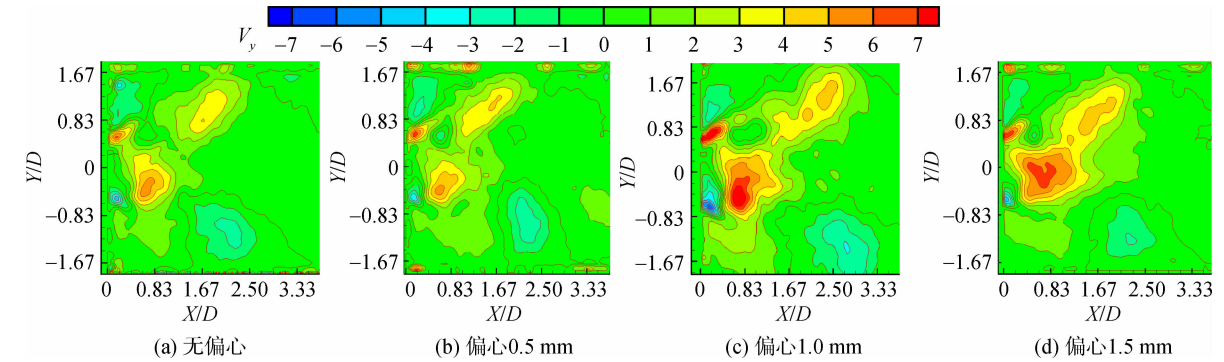


图 7 收缩型出口流场纵截面径向速度分布

Fig. 7 Radial velocity contours at cross-section plane of contraction type flow field

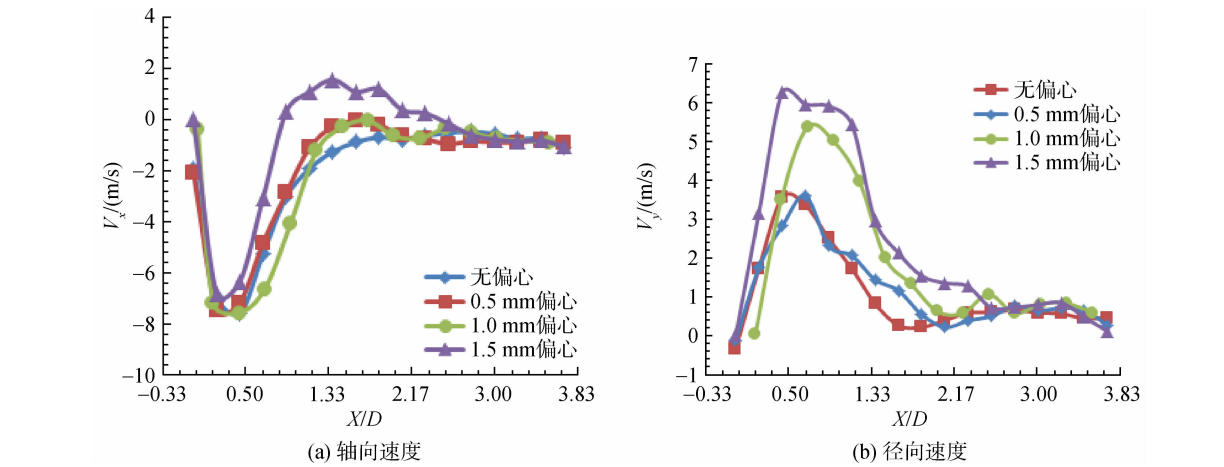


图 8 收缩型出口流场中心线速度分布

Fig. 8 Velocity diagram along centerline of contraction type flow field

度沿径向的分布如图 9、图 10 所示。图 9 结果表明,各截面位置的轴向速度分布吻合较好,但中心处的速度值大小存在差异,如 $X/D=1.0$ 位置,无偏心时中心处的回流速度值 -4.5 m/s ,而偏心 1.5 mm 时则为 0.3 m/s ,中心处的回流速度峰值较低,回流能力弱,导致回流区的面积略小(与图

6 反映规律一致)。虽然峰值大小略有差异,但分布趋势相似性较高,表明偏心对出口轴向速度分布的影响较小。

从图 10 径向速度分布的曲线可知,偏心对径向速度分布的影响较大,无偏心时径向速度分布基本沿 $Y=0$ 对称,但随着偏心量的增加,中心以

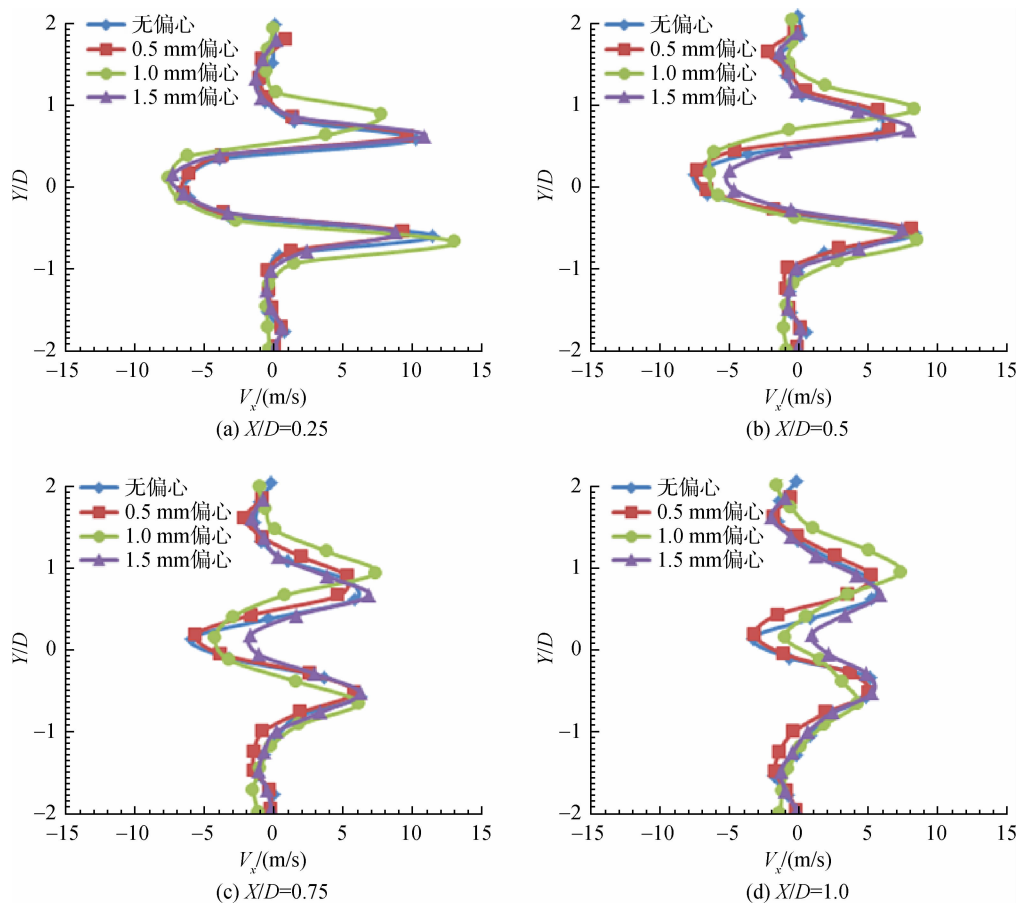


图 9 收缩型出口流场不同截面轴向速度分布

Fig. 9 Axial velocity diagram at dissimilar cross section of contraction type flow field

下区域的径向速度数值增大,偏心量 1.5 mm 时下半区的径向速度均大于零,与上半区同方向流动,回流区不再是上下两个涡的分布结构,流场发生较大变化。其他截面位置的径向速度分布特性也反映出,收缩型流场的出口径向速度分布受旋流器偏心影响较大。

4) 小 结

对比旋流器不同偏小量下的纵截面、中心线及不同轴向位置的轴向、径向速度分布可知,收缩型出口流场受旋流器偏心影响较大,尤其是径向速度分布,旋流器偏心后,偏心方向的射流强度大幅增加,导致径向速度峰值显著增大,流场发生明显变化。原因是,收缩型出口流场的形态主要受二级旋流器出口射流控制。当一级旋流器偏心后,由于文氏管和二级旋流器位置不变,一级旋流器出口射流在文氏管内部的流动将不再均匀,局部方向的射流受到文氏管的壁面阻力会增大,而其他方向受到的阻力会减少,导致二级旋流器出口射流与其交汇时,局部方向射流被强化同时其他方向被弱化(相对无偏心状态的均匀影响而论),从而对出口径向速度分布等产生较大影响。

2.3 旋流器偏心对扩张型出口流场的影响

1) 纵截面轴向速度和径向速度分布

扩张型出口流场($L/D=2.9$)纵截面轴向速度云图(V_x)和径向速度云图(V_y)如图 11、图 12 所示。从图 11 可知,各偏心量下,旋流器出口射流均与壁面交汇,附着点均在 $X/D=0.83$ 附近,回流区以出口射流和壁面为边界,面积较大,沿 $Y/D=0$ 中心线对称性较好。不同偏心量下,出口射流的轴向速度大小、角度均差别不大,由此可知,对于扩张型出口流场,轴向速度分布受旋流器偏心影响极小。

从图 12 可知,随旋流器偏心量的增加,出口径向速度分布基本保持不变,出口射流均呈中心对称,与壁面的附着点均在 $X/D=0.83$ 附近,各偏心量下的出口径向射流速度的大小、角度和回流区面积等基本一致。因此,从图中结果可知,对于扩张型出口流场,出口径向速度分布几乎不受旋流器偏心的影响。

2) 旋流器出口中心线的速度分布

旋流器出口中心线的速度分布见图 13 所示。

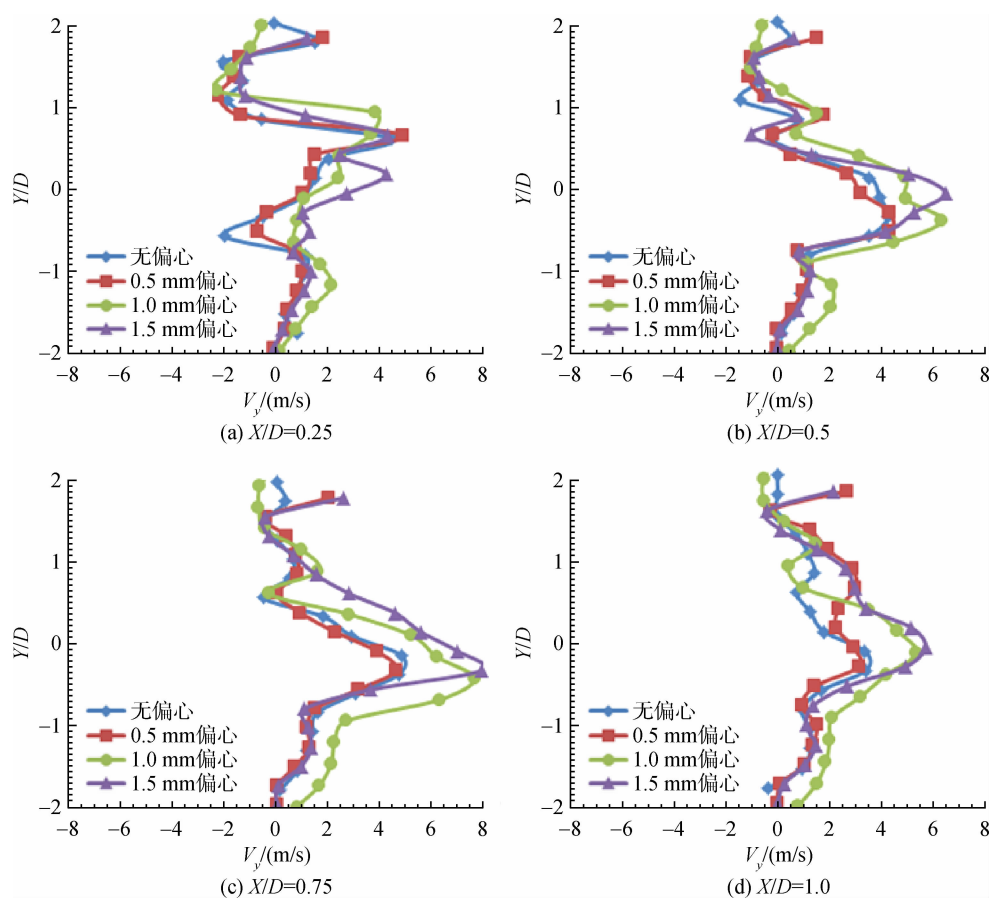


图 10 收缩型出口流场不同截面径向速度分布

Fig. 10 Radial velocity diagram at dissimilar cross section of contraction type flow field

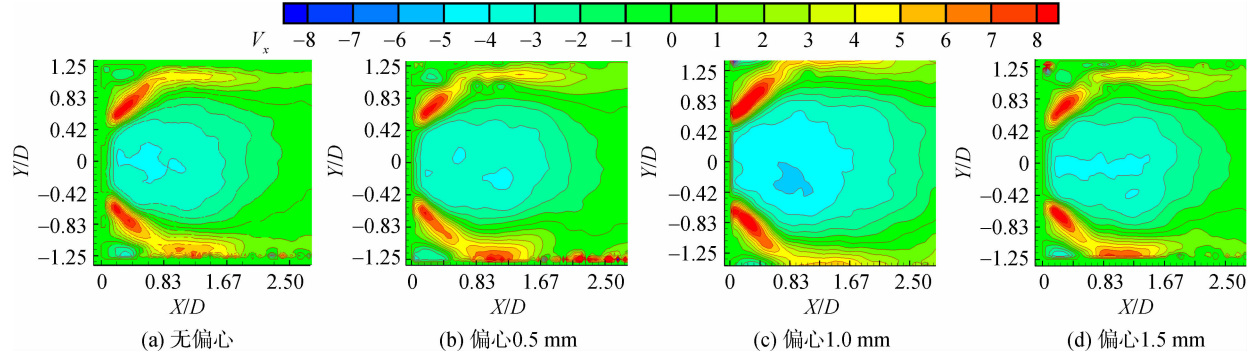


图 11 扩张型出口流场纵截面轴向速度分布

Fig. 11 Axial velocity contours at cross-section plane of expansion type flow field

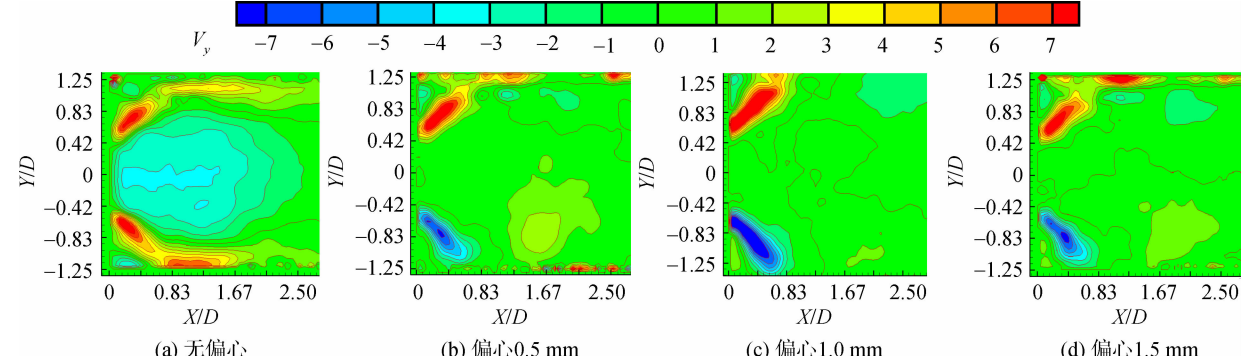


图 12 扩张型出口流场纵截面径向速度分布

Fig. 12 Radial velocity nephogram at cross-section of expansion type flow field

从图 13(a)可知,轴向速度的分布趋势基本不随偏心量的增加而变化,轴向速度的数值和方向基本一致,这与图 9 反映的结果一致,即扩张型出口流场的轴向速度分布几乎不受旋流器偏心的影响。

从图 13(b)可知,旋流器偏心后,径向速度分布趋势吻合度也较高,由于出口回流区是以限制域为边界,面积较大,因此中心线的径向速度较小,从图 13 可知,速度值大小均在 $-1\sim 1\text{ m/s}$ 间浮动。对比各偏心量下的分布趋势、峰值大小可知,对于扩张型出口流场,径向速度分布受旋流器偏心影响较小。

3) 不同轴向位置横截面速度分量沿径向分布

不同偏心条件下,不同轴向位置的 V_x 、 V_y 沿 Y 方向的分布如图 14、图 15 所示。各偏心条件下轴向速度的分布趋势相似,各截面位置的轴向速度分布吻合较好,峰值大小极其接近,如 $X/D=0.25$ 时最大、最小值分别为 8 、 -4 m/s 附近,相差不超过 0.2 m/s ,其他截面位置的数值差异也是如此,表明扩张型流场下,偏心对出口轴向

速度的分布影响较小。

从图 15 径向速度沿径向方向分布可知,不同偏心量下,速度峰值的大小、变化的走势基本一致,如 $X/D=0.25$ 时最大、最小值分别在 8 、 -5.5 m/s 附近, $X/D=0.5$ 时最大、最小值分别在 6.5 、 -5 m/s 附近,差异均较小,表明扩张型流场下,偏心对出口径向速度的分布影响较小。

4) 小 结

对比旋流器不同偏心量下的纵截面、中心线及不同轴向位置的轴向、径向速度分布可知,扩张型出口流场受旋流器偏心影响极小,出口射流强度、角度和回流区大小随偏心量的增加基本保持一致。这是因为,扩张型出口流场的流场形态,主要由二级出口射流和限制域共同作用形成,其中限制域的影响较大(从文献[2]及图 6 结果可知)。当一级旋流器偏心后,虽然一级出口射流的不均匀会对二级旋流器出口射流产生影响,但是在限制域的主导作用下,二级射流仍在限制域壁面存在驻点,回流区仍以限制域为边界。因此,一级旋流器的影响被大大削弱,正如图 11~图 15 所示,

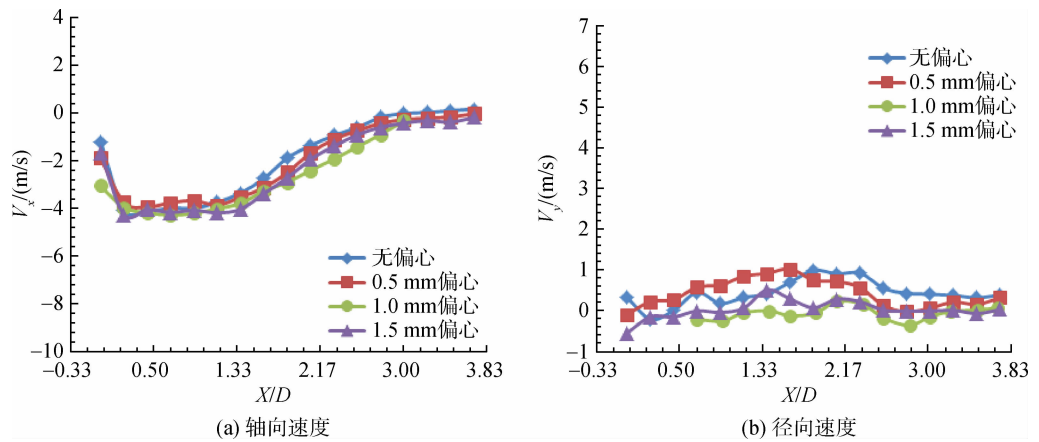
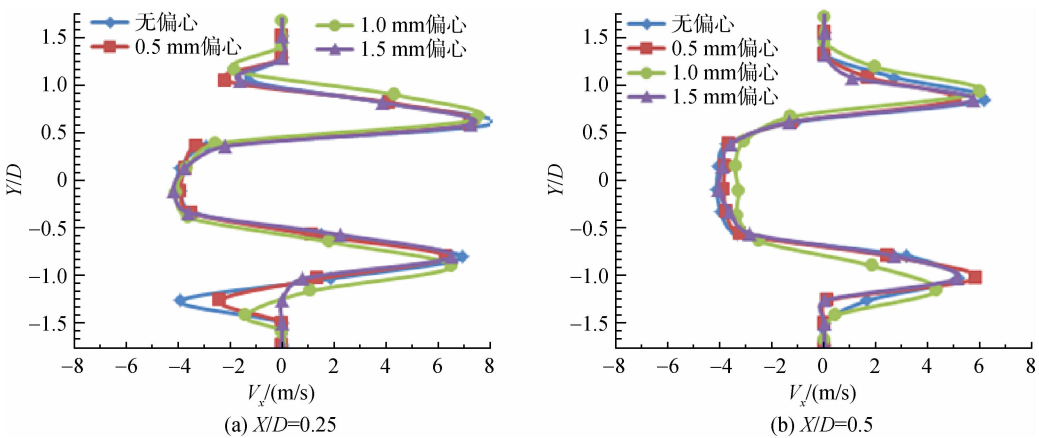


图 13 扩张型出口流场中心线速度分布

Fig. 13 Velocity diagram along centerline of expansion type flow field



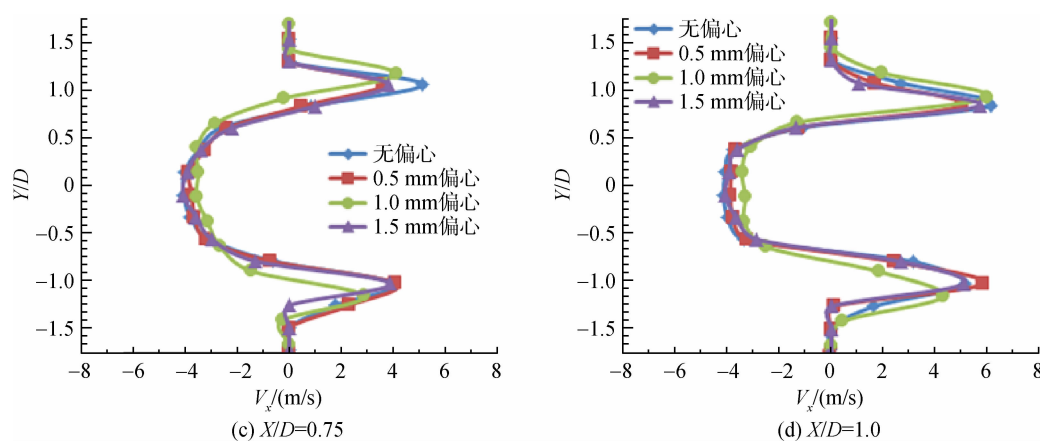


图 14 扩张型出口流场不同截面轴向速度分布

Fig. 14 Axial velocity diagram at dissimilar cross section of expansion type flow field

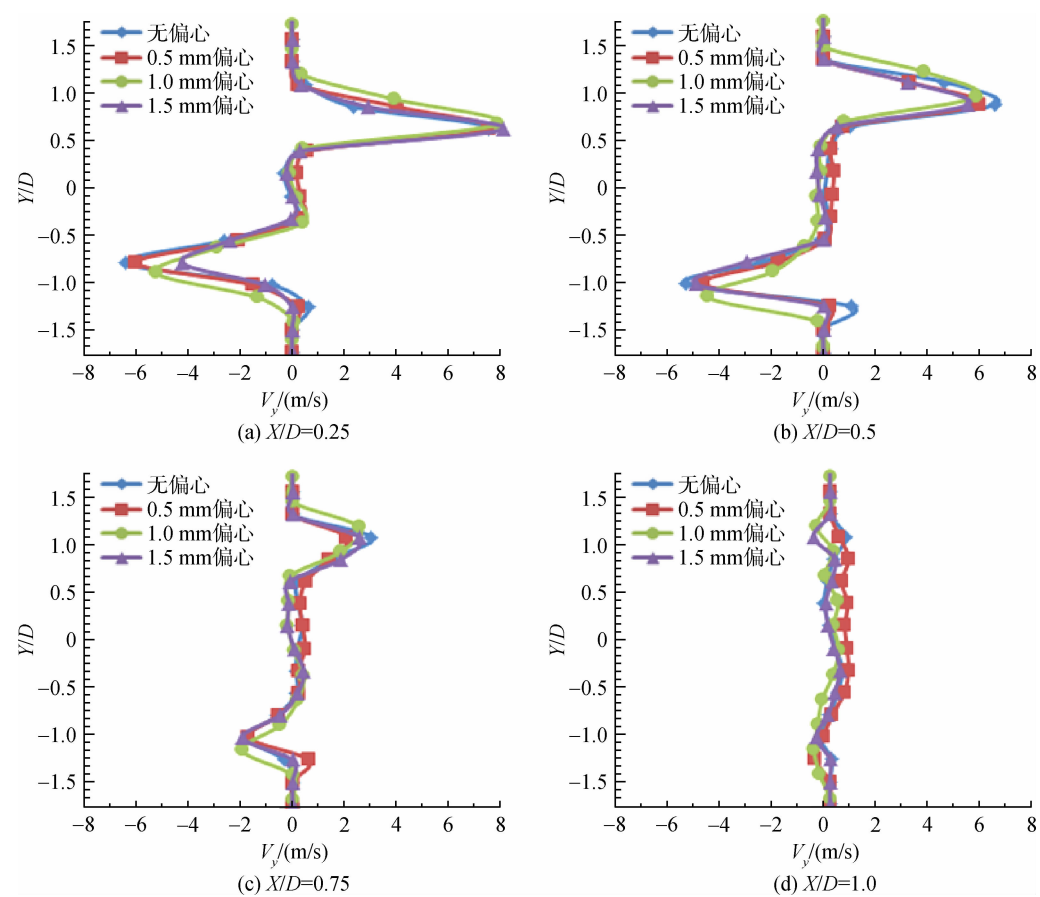


图 15 扩张型出口流场不同截面径向速度分布

Fig. 15 Radial velocity diagram at dissimilar cross section of expansion type flow field

旋流器出口流场基本不随旋流器偏心而发生变化。

3 结 论

采用 PIV 试验研究方式,保持旋流器结构不变,与不同尺寸限制域搭配可获得收缩型或扩张型出口流场(见图 2)。在不同出口流场形态下,

通过研究旋流器偏心后出口流场的变化,得出结论如下:

- 1) 收缩型出口流场受旋流器偏心影响较大,尤其是径向速度分布,其峰值大小等随旋流器偏心明显改变;
- 2) 扩张型出口流场几乎不受旋流器偏心的影响,各偏心量下出口轴向、径向速度基本一致;

3) 旋流器出口流场的形态与其受旋流器偏心的影响密切相关,收缩型流场受影响较大,扩张型流场则几乎不受影响;

4) 通过优化限制域与旋流器特征的尺寸比,使出口呈扩张型流场,可有效削弱旋流器偏心对出口流场的影响。

参考文献:

[1] HSHIAO G,MONGIA H. Swirl cup modeling;Part III grid independent solution with different turbulence models[R]. AIAA 2003-1349,2003.

[2] ATESHKADI A,MCDONELL V G,SAMUELSEN G S. Effect of hardware geometry on gas and drop behavior in a radial mixer spray[J]. Symposium (International) on Combustion,1998,27(2):1985-1992.

[3] HSHIAO G,MONGIA H. Swirl cup modeling;Part II inlet boundary conditions[J]. AIAA 2003-1350,2003.

[4] FU Y,CAI J,JENG S M,et al. Confinement effects on the swirling flow of a counter-rotating swirl cup[R]. ASME Paper 2005-GT-68622,2005.

[5] REDDY A P,SUJITH R I,CHAKRAVARTHY S R. Swirler flow field characteristic in a sudden expansion combustor geometry[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006,22(4):800-808.

[6] FU Yongqiang,CAI Jun,JENG S M. Characteristics of the swirling folw generated by a counter-rotating swirler[R]. AIAA-2007-5690,2007.

[7] CAI Jun,FU Yongqiang,FLOHRE N M,et al. Experimental study on coherent structures of a counter-rotating multi-swirler cup[R]. AIAA 2007-5674,2007.

[8] JENG S M,FLOHRE N M,MONGIA H C. Air temperature effects on non-reacting spray characteristics issued from a counter-rotating swirler[R]. AIAA 2005-355,2005.

[9] 党新宪,赵坚行,张欣,等. 应用 PIV 技术测试模型环形燃烧室流场[J]. 航空动力学报,2009,24(7):1470-1475.

DANG Xinxian,ZHAO Jianxing,ZHANG Xin, et al. Measurements of the flow fields in a model annular combustor using particle image velocimetry[J]. Journal of Aerospace Power,2009,24(7):1470-1475. (in Chinese)

[10] 林宇震,许全宏,刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京:国防

工业出版社,2008.

[11] 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):6-19.

PENG Yunhui,LIN Yuzhen,XU Quanhong et al. Atomization,aerodynamics and combustion performance of swirl cup[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2008, 29(1):6-19. (in Chinese)

[12] 林宇震,刘高恩,王华芳. 反向与同向双旋流器流场的试验研究[J]. 航空动力学报,1995,10(4):423-425.

LIN Yuzhen,LIU Gaoen,WANG Huafang. Experimental in vestigation of the flow field for co and counter swirler [J]. Journal of Aerospace Power,1995,10(4):423-425. (in Chinese)

[13] ROSEFJORD T J,RUSSELL S. Nozzle design and manufacturing influences on fuel spray circumferential uniformity[J]. Journal of Propulsion and Power,1989,5(2):144-150.

[14] ROSEFJORD T J,ECKERLE W A. Aerating fuel nozzle design influence on airflow features[J]. Journal of Propulsion and Power,1991,7(6):849-856.

[15] COHEN J M,ROSEFJORD T J. Influences on the sprays formed by high-shear fuel nozzle/swirler assemblies[R]. Journal of Propulsion and Power,1993,9(1):16-27.

[16] MCDONELL V G,ARELLANO L,LEE S W,et al. Effect of hardware alignment on fuel distribution and combustion performance for a production engine fuel-injection assembly[J]. Symposium (International) on Combustion,1996, 26(2):2725-2732.

[17] 胡好生,蒋尧,卢克乾,等. 偏心对双级旋流器出口流场影响试验[J]. 航空动力学报,2015,30(5):1025-1031.

HU Haosheng,JIANG Yao,LU Keqian,et al. Experiment on effect of misalignment on outlet flow field of double-swirler[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(5): 1025-1031. (in Chinese)

[18] 蒋尧,胡建,胡好生. 偏心对双级旋流器出口流场影响数值模拟[J]. 航空动力学报,2015,30(12):2919-2924.

JIANG Yao,HU Jian,HU Haosheng. Numerical simulation on the effect of misalignment on outlet flow field of double-swirler[J]. Journal of Aerospace Power,2015, 30(12):2919-2924. (in Chinese)

[19] 蒋尧. 双级旋流器偏心对出口流场影响研究[D]. 北京:中国航空研究院,2013.

(编辑:叶 青、张 雪)