

文章编号:1000-8055(2009)11-2506-08

# 套筒长度对火焰筒流场和雾化特性的影响

于锦峰<sup>1</sup>, 郭志辉<sup>1</sup>, 张君锋<sup>2</sup>, 尚守堂<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力科技重点实验室, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳航空发动机设计研究所, 沈阳 110015)

**摘 要:** 利用激光粒子动态分析仪实验研究了套筒长度对火焰筒头部的流场和喷雾场的影响. 结果表明: 套筒长度控制流场的发展, 影响顺流区壁面再附点的位置, 随着套筒长度的增加, 再附点向下游移动. 套筒的长度存在一个临界值, 使中心回流区的尺寸最大. 套筒对雾化的影响较大, 在回流区内, 套筒长度最小时雾化效果较好. 在顺流区内, 液雾的索太尔平均直径随着套筒长度的增加而逐渐减小. 套筒加长时喷雾锥角有所减小. 套筒的最佳长度选择需要综合考虑燃烧室的具体设计要求.

**关 键 词:** 旋流杯; 套筒; 流场; 雾化

**中图分类号:** V231.2

**文献标识码:** A

## Experimental study the effect of flare sleeve length on the flowfield and spray characterization of a combustor swirl cup

YU Jin-feng<sup>1</sup>, GUO Zhi-hui<sup>1</sup>, ZHANG Jun-feng<sup>2</sup>, SHANG Shou-tang<sup>2</sup>

1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines,  
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,  
Beijing 100191, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute,  
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** The two-phase flow field of combustor dome with double swirlers, venturi and flare sleeve was studied experimentally using two-dimensional particle dynamics analyzer (PDA). The velocities, diameter, volume flux of droplets were measured, while the effects of the flare sleeve length on the flow field and atomization were analyzed. The flowfield downstream created by flare sleeves with different lengths is of the same structure, which includes central recirculation zone and corner recirculation zone. The flare sleeve length controls the development of flow field and affects the attachment point of the flow, which moves downstream with the increase of the length. The size of the recirculation zone is biggest when the flare sleeve length reaches a critical value. The Sauter mean diameters(SMD) produced by the shortest flare sleeve are smallest in the recirculation zone, showing good atomization. The atomization improves outside the recirculation zone with the increase of the flare sleeve length. The spray cone angle decreases with the increase of the flare sleeve length. The selection of the optimum sleeve length depends on the needs of combustion performances.

**Key words:** swirl cup; flare sleeve; flowfield; spray

**收稿日期:** 2008-11-12; **修订日期:** 2009-08-10

**作者简介:** 于锦峰(1983-), 男, 山东威海人, 硕士生, 主要从事航空发动机燃烧室方面研究.

由于采用离心喷嘴的燃烧室存在着冒烟高、出口温度分布难于调整等不足,在 60 年代中后期,燃烧室的设计开始采用空气雾化喷嘴.美国 GE 公司开发的双旋流空气雾化喷嘴(简称旋流杯 swirl cup),由于具有良好的燃烧性能和排放,并能解决离心喷嘴存在的不足,被广泛应用,如 CF6,CFM56,GE90,T700 及 CF34 等型号<sup>[1]</sup>.

近年来,国内外对旋流杯空气雾化喷嘴的流场、喷雾场和燃烧性能开始了大量的研究<sup>[1-8]</sup>.Mongia<sup>[2-3]</sup>等人对当前旋流杯的经验设计方法进行总结,并采用不同的建模方法对旋流杯进行模拟.Jeng 和 Mongia<sup>[4]</sup>等人采用二维的相位多普勒粒子分析仪(PDPA)研究了 CFP56 旋流杯下游液雾索太尔平均直径( $d_{32}$ )和液滴尺寸的空间分布情况.袁怡祥等人<sup>[5]</sup>的相关研究也表明:在影响旋流杯的流场和喷雾场的因素中,套筒是非常重要的影响因素,套筒的出口形状及扩张角,控制了喷嘴下游的喷雾场及流场特性.

Jong-Hoon Park 等人<sup>[6]</sup>雾化研究了套筒扩张角的影响,结果表明套筒尾部扩张角既限制了喷雾角的大小,也限制了二次旋转气流沿径向扩张的尺度;而且还能有效地控制了燃烧排气污染物的生成.Wang 和 McDonnell<sup>[7]</sup>等对 CFM56 旋流杯套筒的出口形状对流场和喷雾场的影响进行了研究<sup>[7]</sup>,表明平滑套筒可能使燃油液滴分布在很宽的范围,油气混合更均匀.彭云晖等人<sup>[8]</sup>采用

粒子图像测速(PIV)技术对两种不同旋流杯出口套筒的主燃区流场进行测量研究表明收口套筒减小了旋流的出口张角,可能使得油气混合发生在较小的区域内,同时中心回流区尺寸变小,长度变短.

本文以某型旋流杯为研究对象,利用激光粒子动态分析仪(particle dynamics analyzer,简称 PDA)研究套筒长度的变化对流场和喷雾场的影响,为燃烧室头部旋流杯的设计提供实验依据.

## 1 实验装置及方法

实验台由供气系统、供液系统、喷雾测量系统和收集系统等组成.气源供气压力 0.6 MPa,实验时保持气流压降  $\Delta p = (4.0 \pm 0.02)$  kPa;供液系统采用高压空气挤压供液,用水代替航空煤油作为工作介质,实验时气液质量比为 4.喷雾测量采用 DANTEC 公司二维 PDA,测量液雾的速度、直径和体积通量.

实验中采用的旋流杯是由离心喷嘴、一级旋流器(斜切孔)、文氏管、二级旋流器(径向)和套筒组成,其中一级旋向为顺时针方向(从上游看),二级旋向与其相反;火焰筒长 400 mm,横截面 92 mm × 92 mm,图 1 是实验件安装简图.

套筒结构如图 2 所示,采用平滑套筒出口,出口角度为 90°,实验中套筒长度分别  $L$ (套筒 A),  $L + 3$  mm(套筒 B),  $L + 6$  mm(套筒 C),  $L + 9$  mm(套筒 D).

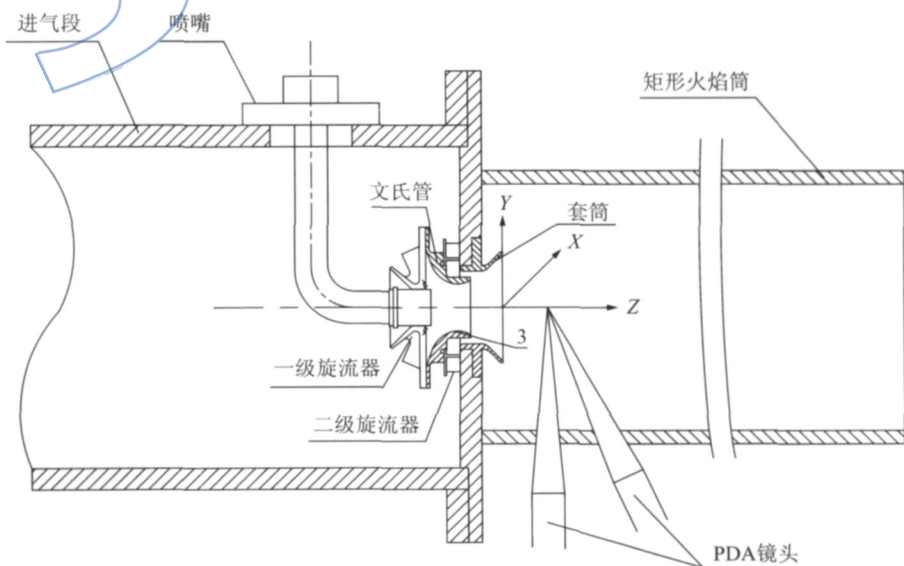


图 1 实验件安装简图

Fig. 1 Experimental setup and model combustor

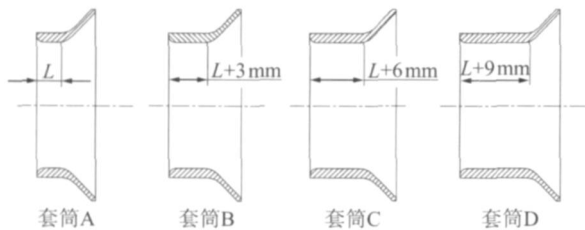


图2 套筒结构图

Fig. 2 Structure parameters of flare sleeve

测量时选坐标系的原点  $O$  位于旋流杯出口平面的中心,沿喷嘴喷射方向为  $z$  方向,测量截面以套筒出口为原点选取. 实验中测量距套筒出口原点 5, 10, 15, 25, 30, 35, 40, 50 mm 和 60 mm 等截面上分别在  $x, y$  向两个方向上测量,得到液滴三维速度和直径,测量点的间隔为 2 mm,每个点采集 5000 个有效粒子,处理数据时,以  $10\mu\text{m}$  以下液滴的速度代表气相速度.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 套筒混合段长度对流场的影响

图 3 为不同长度套筒在相同工况下纵截面上的轴向速度分布云图与 UV 矢量. 可见,不同套筒旋流杯产生的流场基本相同,内外级旋流气体进入燃烧室,所形成的流场的典型特征存在中心回流区和角回流区,前者是旋流作用的结果,而后者是由于突扩面处的流动扩张形成的. 二者分别位于顺流区的两侧,并且和顺流区形成内外两个剪切层. 中心回流区和角回流区的尺度,取决于旋流强度、燃烧室的结构,起着稳定火焰的作用,并决定火焰的结构形状.

从图 3 中可以看出,套筒长度不同时产生的流场也存在显著的不同点,即再附点的位置和角回流区的大小不同. 随着套筒长度的增加,再附点的位置随着轴向向下移动,这也说明角回流区变大. 这是由于套筒长度越小,内外旋流器的气流在套筒内相互作用的时间短,两股旋转气流离开套筒出口径向速度大,使径向速度与轴向速度的矢量角变大,导致产生的角回流区减小. 但套筒长度越长,限制了气流的径向发展,轴向速度衰减慢,再附点延后. 可见,套筒长度控制流场的发展.

图 4 是不同长度套筒产生的中心回流区的边界. 可见,在  $z = 30\text{ mm}$  之前,套筒越短,回流区越宽. 而在  $z = 30\text{ mm}$  之后,套筒 B 形成的中心回流区的半宽度最大,大约 37 mm,其它套筒的中心回流区的宽度比套筒 B 小 5~8 mm,这说明套筒长

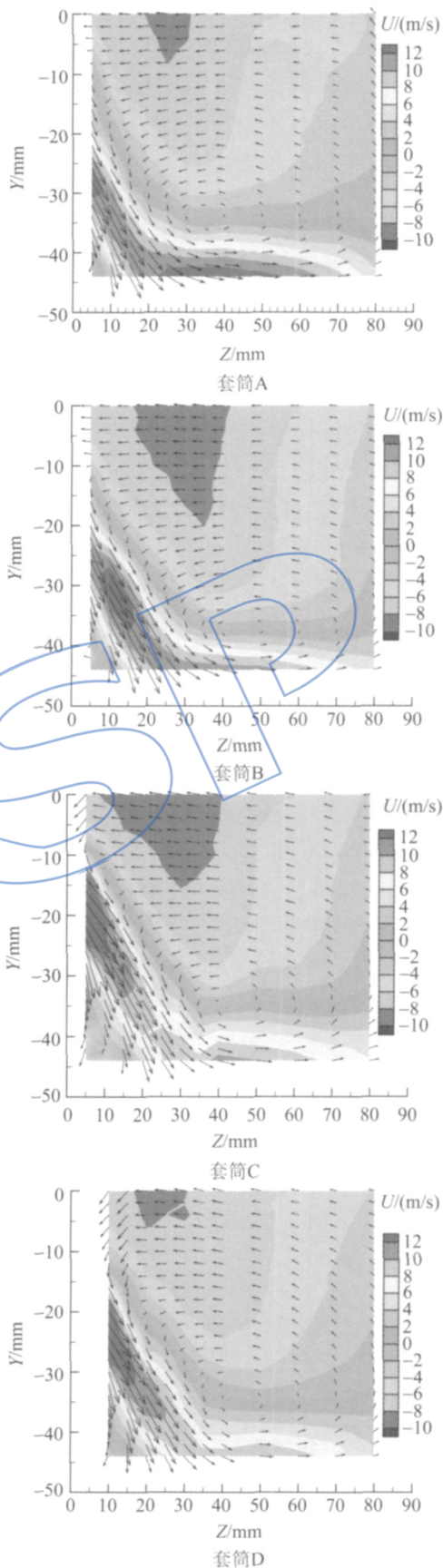


图3 Y-Z面回流区和速度矢量图

Fig. 3 Recirculation zone and velocity vectors at Y-Z plane with different flare sleeves

度影响中心回流区的宽度,存在着一个临界长度能够形成最大的中心回流区宽度.套筒 B 在  $Z = 40\text{ mm}$  的截面上中心回流区的宽度达到最大,套筒 A 对应的流场在  $Z = 30\text{ mm}$  截面宽度达到最大,套筒 D 在  $Z = 50\text{ mm}$  的截面达到.这说明随着套筒长度的增加,中心回流区达到最大宽度的轴向位置向下游移动.因此,套筒的长度特征尺寸存在一个临界值,此时中心回流区的宽度达到最大,设计时如何选取套筒的长度需要与主燃区的匹配综合考虑.

图 5 为不同长度套筒  $Y$  方向的轴向平均速度分布.可见,从  $10\text{ mm}$  截面到  $20\text{ mm}$  截面,轴向平均速度呈现典型双峰结构,在中心处达到最大负速度,套筒 D 的轴向速度的峰值最大,套筒 A 最小.轴向速度最大峰值的位置随着套筒长度的增加向中心移动;最大回流速度变化不大,这说明套筒长度的改变对回流区轴向速度的改变不大,

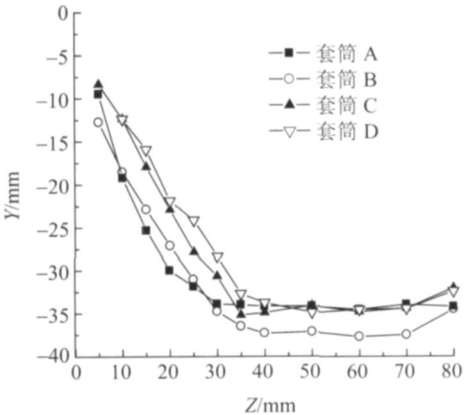


图 4 套筒长度对中心回流区边界的影响

Fig. 4 Effect of flare sleeve on the boundary of central recirculation zone at  $Y$ - $Z$  plane

但影响到回流量.从  $30\text{ mm}$  截面到  $50\text{ mm}$  截面,不同长度套筒产生的回流区的宽度逐渐达到最大,套筒 B 产生的回流区最大,

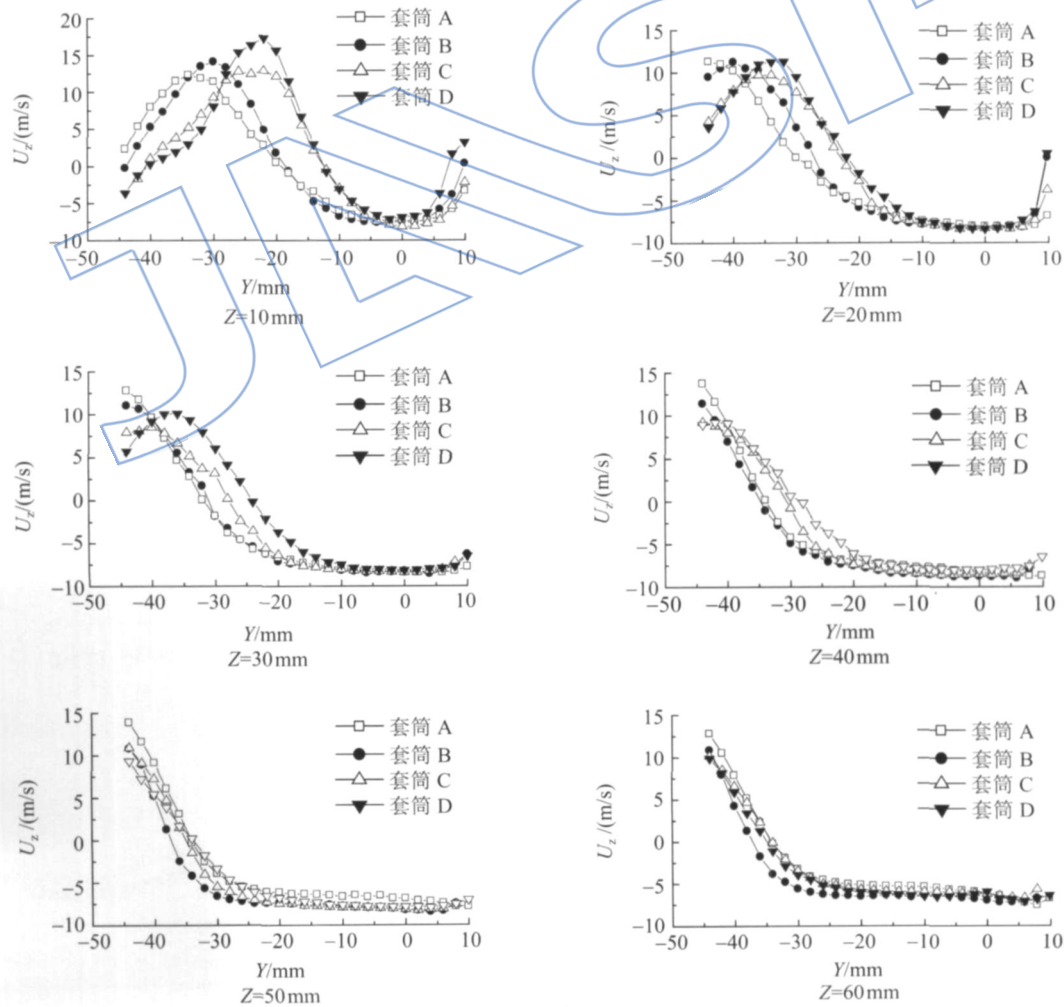


图 5 套筒长度对  $Y$  方向的轴向平均速度分布的影响

Fig. 5 Effect of flare sleeve length on axial velocity profiles at  $Y$ - $Z$  plane

图6为不同套筒长度 $x$ 方向的轴向平均速度,其规律与 $y$ 方向的轴向平均速度变化规律基本一致.不同点在于,不同长度套筒产生最大负速度范围(回流区的宽度)小于 $y$ 方向相对应的最大负速度范围,回流区的宽度在 $x$ 方向的宽度从35 mm截面以后就小于 $y$ 方向.这是由于在使用PDA测量时,为使激光能进入测量区域,需要在 $x$ 方向上开槽,导致出现上述情况.

图7为不同套筒流场的切向速度分布图.内外两级旋流的切向动能的消耗大部分是在套筒里发生的.而离开套筒进入火焰筒空间后,内旋流的切向动能基本消耗完毕,而外旋流由于其切向动能较内旋流大,所以依然保持着一小部分切向动能使之在火焰筒空间里还有旋转运动,但切向速度同样衰减很快.可以看出:在套筒出口中心附近,套筒长度对切向速度变化不大,随着径向距离的增加,套筒A流场的切向速度最大.随着轴向距离的增加,在不同截面上,随着套筒长度的增

加,切向速度逐渐减小,套筒A流场的切向速度最大.这是由于套筒长度减小,内外旋流器的两股气流在套筒内相互作用的时间变短,两股旋转的气流切向速度相互影响较小,导致最小长度套筒产生较大的切向速度.

图8是套筒出口下游各截面的湍流动能分布,湍流动能反映了内外两级旋流气体之间相互作用的强弱.内外两级旋流在文氏管的出口处相遇,在套筒内发生强烈掺混后进入火焰筒.从图8中可以看出:各个截面上的湍流动能在回流区的边界处达到最大;随着轴向距离的增加,不同长度套筒的湍流动能逐渐减小.在回流区中心区域内,套筒A流场具有最大的湍流动能,而在回流区的边界和顺流区内,具有最小的湍流动能.这是由于套筒长度短,内外两级旋流气体之间相互作用的时间短,导致了中心区域内具有较大的湍流动能.

## 2.2 套筒长度对雾化特性的影响

图9为不同长度套筒在不同截面上 $d_{32}$ 的分布

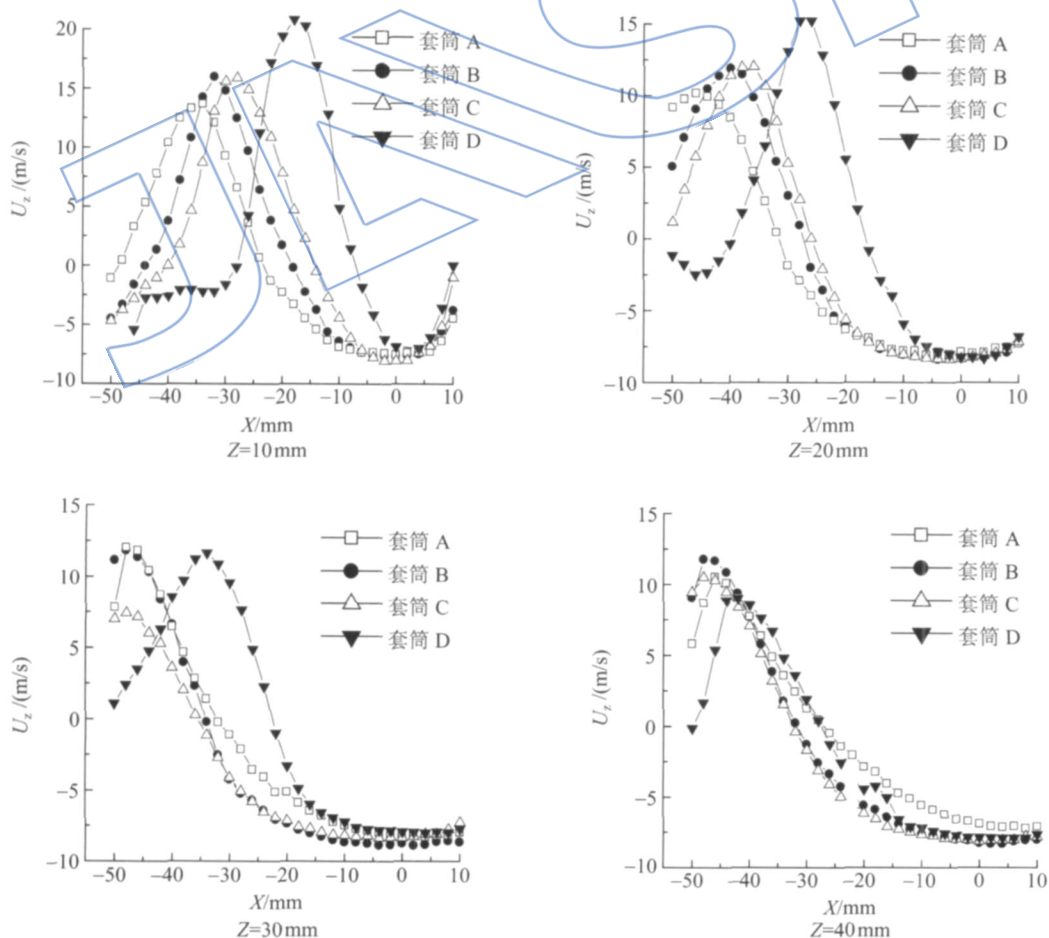


图6 套筒长度对 $x$ 方向的轴向平均速度的影响

Fig.6 Effect of flare sleeve length on axial velocity profiles at  $X$ - $Z$  plane

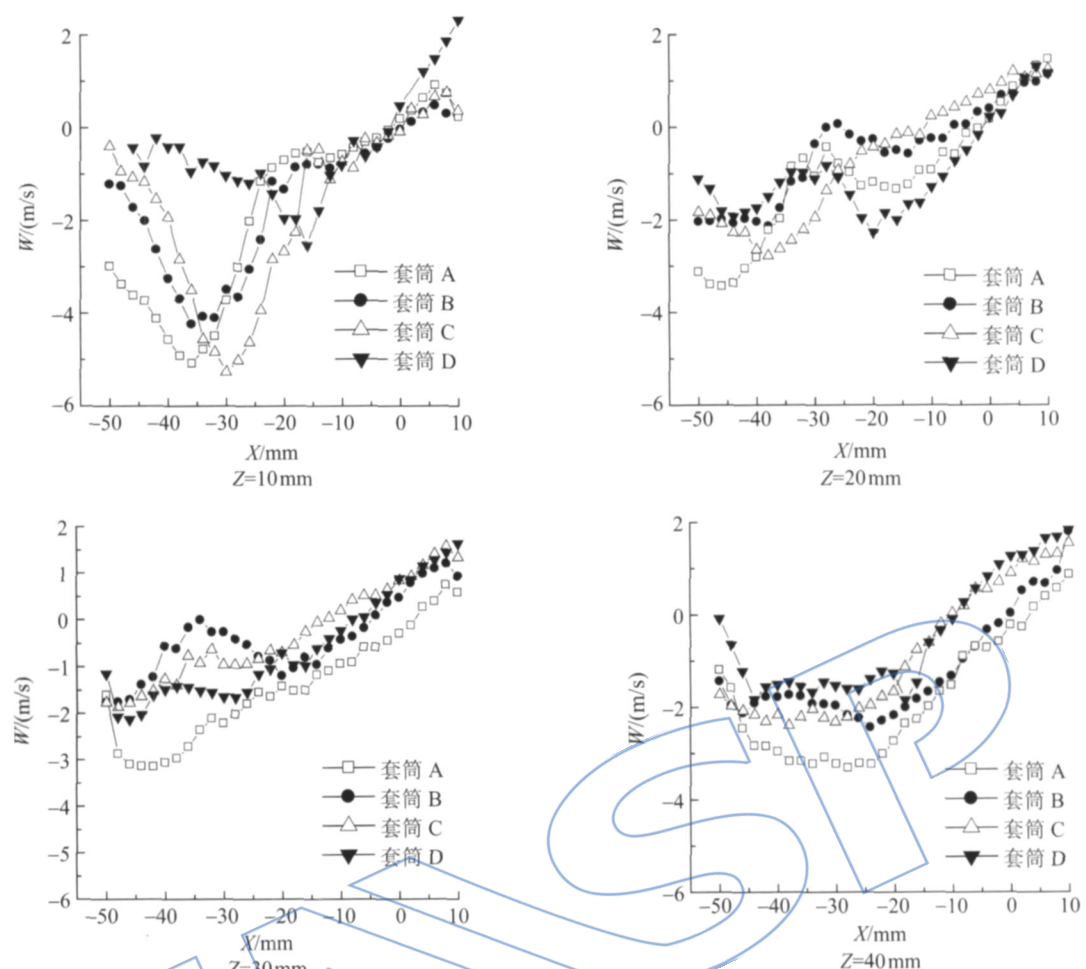


图 7 不同长度套筒切向速度分布

Fig. 7 Effect of flare sleeve length on tangential velocity profiles

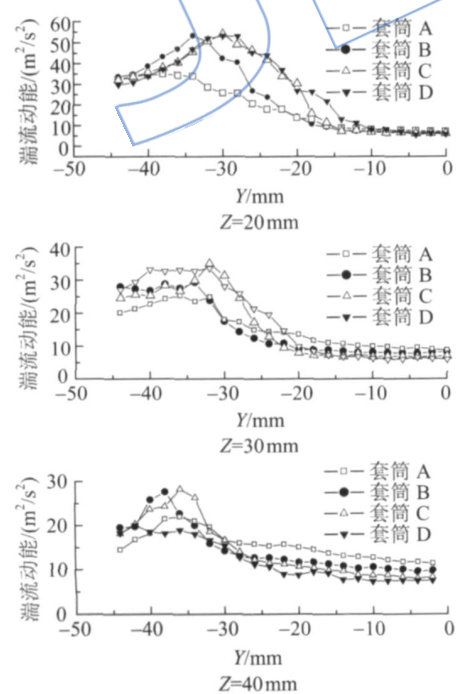


图 8 不同长度套筒湍流动能分布图

Fig. 8 Effect of flare sleeve length on turbulent kinetic energy profiles

图. 试验结果表明  $d_{32}$  的最大值出现在锥形喷雾边界处,而最小  $d_{32}$  值出现在中心回流区处,该处的液滴受到气流的作用而回流,形成了较小的  $d_{32}$ . 随着回流区向下游发展液滴运动到更大的径向范围,  $d_{32}$  最大值减小. 从图中可以看出:在套筒出口处,不同长度的混合段对  $d_{32}$  的大小影响不大. 随着轴向距离的增加,在回流区范围内,套筒 A 的  $d_{32}$  最小,雾化效果好;在  $Y = -20\text{ mm}$  附近,不同长度套筒形成了几乎相同的  $d_{32}$ ,这是由于这些液滴大部分来源于燃油喷嘴的直接雾化;随着径向距离的增加(大于  $20\text{ mm}$ ),不同长度的套筒形成的  $d_{32}$  逐渐增加,并且  $d_{32}$  随着套筒长度的增加而逐渐减小,套筒 D 的  $d_{32}$  达到最大,套筒加长使一部分雾化好的液滴打在套筒的内壁面上,导致了此现象的产生.

图 10 不同长度套筒在不同截面上通量分布. 沿燃烧室横截面的燃油分布,在一定程度上反映了能量释放的分布. 可见,四种情况下,在回流区和外围液雾的通量很低,液滴主要集中在回流区

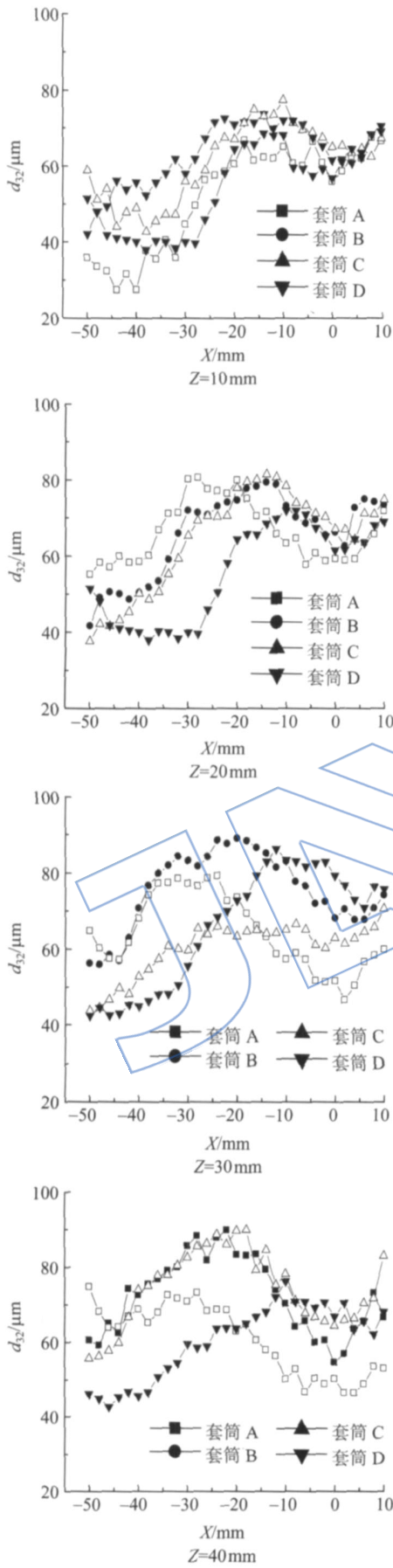


图 9 套筒长度对  $d_{32}$  分布的影响  
Fig. 9 Effect of flare sleeve length on  $d_{32}$  profiles

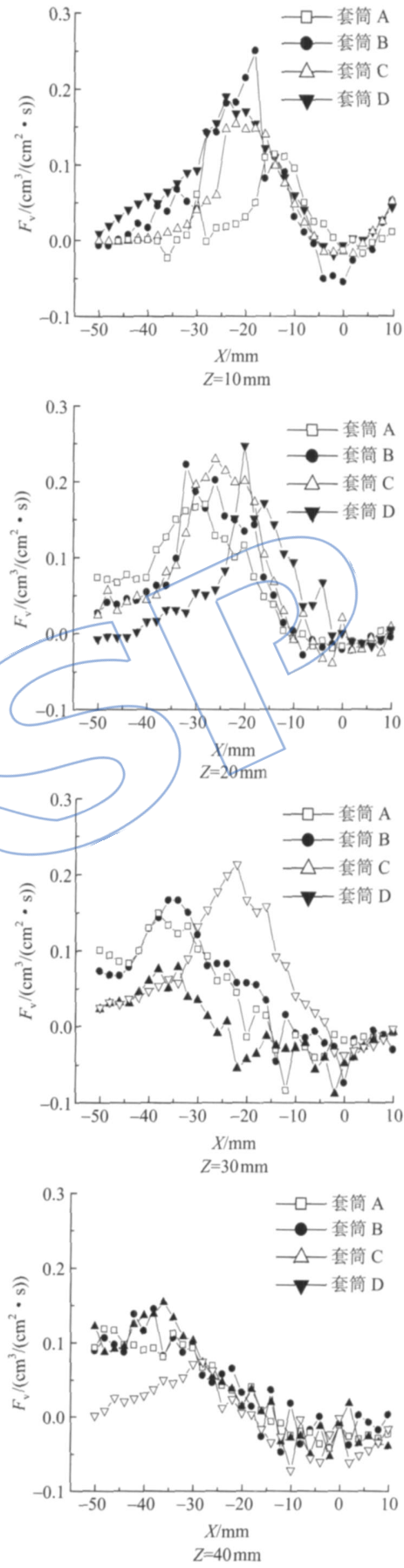


图 10 套筒长度对液雾体积通量分布的影响  
Fig. 10 Effect of flare sleeve length on volume flux profiles

外顺流区附近,这是由打在文氏管上的液体雾化形成的.同液雾的  $d_{32}$  一样,通量的分布也是由燃油的初始雾化和火焰筒头部的流场结构决定的.从图 10 可以看出,套筒长度对液雾通量分布的影响主要是各截面上峰值的位置不同,两个较短筒的喷雾场的通量峰值更靠外,而较长套筒的峰值更靠内.从通量分布看,套筒越长,使液雾进入火焰筒的位置延后,而且有部分液滴打在套筒内壁上,限制了液滴的径向运动,形成的喷雾锥角越小,进而影响到火焰的结构和燃烧的性能.

### 3 结 论

1) 套筒控制火焰筒头部流场的发展,随着套筒长度的增加,再附点向下游移动,回流区相对后移.套筒的长度存在一个临界值,使中心回流区的尺寸最大,比这个临界值大或者小,都会使得中心回流区的尺寸和长度减小.

2) 套筒长度对雾化特性有较大影响,在回流区范围内,套筒长度最小时液雾  $d_{32}$  最小,雾化效果好;在顺流区内,  $d_{32}$  随着套筒长度的增加而逐渐减小.

3) 套筒长度的改变对液滴的通量分布和喷雾锥角有很大的影响.套筒加长,使液雾进入火焰筒的位置延后,形成的喷雾锥角减小,这可能影响到火焰的结构和燃烧的性能.

4) 套筒长度是旋流杯设计的重要环节,需要综合考虑流场、雾化性能和燃烧性能,设计时应根据具体情况确定最佳套筒长度.

### 参考文献:

- [1] Mongia H C, Samuelsen G S, Danis A, et al. Swirl cup modeling: Part I [R]. AIAA 2001-3576, 2001.
- [2] Hsiao G, Mongia H C, Vij A. Swirl cup modeling: Part II—Inlet boundary conditions [R]. AIAA 2003-1350, 2003.
- [3] Hsiao G, Mongia H C. Swirl cup modeling: Part III—Grid independent solution with different turbulence models [R]. AIAA 2003-1349, 2003.
- [4] Jeng S M, Flohre N M, Mongia H C. Swirl cup modeling atomization [R]. AIAA 2004-2137, 2004.
- [5] 袁怡祥, 林宇震, 刘高恩. 旋流杯燃烧室头部流场与喷雾对贫油熄火的影响 [J]. 航空动力学报, 2004, 19 (3): 332-337.  
YUAN Yixiang, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. The effect of flowfield and fuel spray of combustor with swirl cup on lean blowout limit at idle condition [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 332-337. (in Chinese)
- [6] Park J H, Hwang S S. Effect of swirl cup on characteristics of fuel spray in gas turbine combustors [R]. AIAA 2000-3352, 2000.
- [7] 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: 282-289.
- [8] 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 Yuhui, LIN Yuzhen, XU Quanhong, et al. Atomization, aerodynamics and combustion performance of swirl cup [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(1): 1-14. (in Chinese)