

旋流器型式对空气雾化喷嘴雾化特性影响规律

桂 韬^{1,2}, 夏丽敏², 邱 伟², 房人麟²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 采用试验与数值计算相结合方法研究了不同旋流器型式对双旋流式空气雾化喷嘴喷雾特性的影响规律。采用粒子图像测速(PIV)测量了不同空气雾化喷嘴下游流场结构,并且采用高速摄影仪和激光粒度分析仪,对不同空气流量和燃油流量下的双级旋流空气雾化喷嘴的油雾场形态、索太尔平均直径(SMD)、Rosin-Rammler 分布进行试验研究;同时采用数值计算方法获得了带双级轴向旋流器的空气雾化喷嘴二次雾化特性。结果表明:相同的工况条件下,带双级轴向旋流器的空气雾化喷嘴雾化锥角会稍大于径向旋流器。带双级径向旋流器的空气雾化喷嘴主要依靠离心喷嘴本身进行雾化,空气雾化效果有限,而带双级轴向旋流器的空气雾化喷嘴在进出口总压损失较小时离心喷嘴本身的一次雾化占主导地位,在总压损失增大后气动雾化效果逐渐起主要作用。数值计算结果与试验结果符合较好,表明该数值计算方法可用于空气雾化喷嘴雾化过程数值模拟,并且利用数值计算结果解释了燃油二次雾化过程。

关 键 词: 旋流器类型; 双级旋流空气雾化喷嘴; 雾化特性; 一次雾化; 二次雾化

中图分类号: V235.1

文献标志码: A

Effect of swirler types on spray characteristics of airblast atomizer

GUI Tao^{1,2}, XIA Limin², QIU Wei², FANG Renlin²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: The influences of different swirler types on the spray characteristics of dual-stage swirl airblast atomizer were investigated by using a combination method with experiment and numerical calculation. Particle image velocimetry (PIV) was applied to measure the downstream flow field structures of different swirler types, a high-speed camera and a laser particle size analyzer were used to photograph the atomization morphology, measure Sauter mean diameter (SMD) and Rosin-Rammler distribution under different air flow and fuel flow rates. At the same time, the secondary atomization characteristics of the dual-axial swirl cup were obtained by using the numerical calculation method. The results showed that, under the same working conditions, the atomization cone angle of the atomizer with two-stage axial swirler was slightly larger than

收稿日期:2021-04-09

作者简介:桂韬(1990—),男,工程师,博士生,研究领域为先进航空发动机主燃烧室设计与预先研究。E-mail:924572789@qq.com

引用格式:桂韬,夏丽敏,邱伟,等. 旋流器型式对空气雾化喷嘴雾化特性影响规律[J]. 航空动力学报,2022,37(3):465-477. GUI Tao, XIA Limin, QIU Wei, et al. Effect of swirler types on spray characteristics of airblast atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 465-477.

that of the radial swirler. The atomization process with dual-stage radial swirler mainly relied on its centrifugal atomization of the atomizer, and the air assisted atomization was limited. The atomization process with dual-stage axial swirler was mainly affected by the first atomization of the atomizer when the pressure loss of swirl cup was small. With the increase of pressure loss, the air assisted atomization effect gradually played a major role. The numerical calculation results were in good agreement with the experimental results, indicating that the numerical calculation method can be used to simulate the atomization process of the dual-stage swirl airblast atomizer, and the numerical results can be used to explain the secondary atomization process.

Key words: swirler type; dual-stage swirl airblast atomizer; atomization characteristics; first atomization; secondary atomization

双级旋流式空气雾化喷嘴是一种常用的燃油空气雾化装置,现在已经应用于多种燃气轮机的燃烧系统,包括CF6,CFM56,GE90,GP7000和CF34^[1]。典型的双级旋流式空气雾化喷嘴主要由中心安装的燃油喷嘴和双级旋流器两部分组成,其中旋流器由一级旋流器、文氏管、二级旋流器和套筒等结构组成。中心燃油喷嘴的类型可以是单油路离心喷嘴、直射式喷嘴或者双油路离心喷嘴。旋流器的种类可以是轴向旋流器、径向旋流器或者是斜切径向旋流器。双级旋流式空气雾化喷嘴组件中处于内侧的为一级旋流器,主要作用是促进燃油雾化;处于外侧的为二级旋流器,主要作用是在火焰筒头部下游形成稳定的、且具有一定回流量的且尺寸合适的回流区,用于稳火,同时与一级旋流器中的空气相互剪切,进一步促使燃油雾化。中心安装的喷嘴目前应用较多的是双油路离心喷嘴。

目前对于双旋流空气雾化喷嘴的研究以试验研究为主。刘存喜^[2]通过试验方法对多级旋流空气雾化喷嘴的雾化特性进行了研究,建立了先进的平面激光雾化特性测试平台,重点分析了离心喷嘴初始雾化和旋流空气对雾化特性的影响规律。张弛等^[3]研究了一种直射式供油的双旋流式空气雾化喷嘴的喷雾性能,在常温常压下进行喷雾试验,研究了不同空气压力降和气液比工况下液雾的索太尔平均直径(SMD,量符号记为 D_{sm})及分布指数。徐华胜等^[4]、王志凯等^[5]、郭新华等^[6]都对不同的双旋流空气雾化喷嘴的喷雾特性进行了研究,研究了不同空气压力降和喷嘴供油压力工况下的SMD和分布指数以及油雾锥角的变化规律。金仁瀚等^[7]采用粒子图像测速仪(PIV)对双旋流单头部燃烧室油雾特性进行了试验测量,陈俊等^[8]采用相位多普勒分析仪(PDPA)试验研

究了双路离心喷嘴供油压力对液滴尺寸和喷雾锥角的影响规律,张善军等^[9]采用高清照相机和PDPA对不同错位程度(偏心和凹凸)的双旋流式空气雾化喷嘴的雾化形态,SMD,R-R(Rosin-Rammler)分布形式进行了试验研究。康尧等^[10]、于锦峰等^[11]发现文氏管及套筒结构的变化对燃烧室的头部流场、喷雾分布和粒径有很大影响。

空气雾化喷嘴燃油雾化过程包括一次雾化过程和二次雾化过程,其中涉及到多尺度结构、雾化油珠尺寸小、时间短等诸多复杂因素,从而使得仅仅依靠试验手法研究,无法解释空气雾化喷嘴雾化机理,因此燃油雾化数值模拟研究非常有必要开展。Sun等^[12]采用商业软件Fluent 18.0中压力旋流雾化喷嘴的线性化不稳定液膜雾化(Lisa)模型模拟液滴从喷嘴喷出后的液滴初始速度和粒径分布,再采用TAB(Taylor-analogy-breakup)模型来模拟液滴的二次雾化过程,得到了较好的液滴粒径分布和速度分布规律,与PDPA测量得到的试验结果相比,数值计算结果得到的SMD偏小。Yoo等^[13]采用波破碎模型(wave breakup model)来模拟初次雾化和二次雾化过程,分析了动量比和沿下游流动的环境气体温度变化的穿透深度和SMD分布,数值计算得到的SMD以及粒径分布跟Stenzler的试验结果相似。李营等^[14]使用Fluent软件,采用离散相模型(discrete phase model, DPM)模拟了燃油在不同压力、不同温度下燃油的二次雾化过程,模拟获得了燃油的喷雾形态和不同工况时贯穿距以及SMD,并与试验数据吻合较好。Hassani等^[15]利用OpenFOAM研究了实心锥压力旋流雾化喷嘴,二次雾化模型使用了TAB模型和Reitz-Diwakar模型,结果表明两种二次雾化模型都有很好的一致性,但TAB模型收敛得较快。Ling等^[16]提出了一种用于雾化模拟的多尺度

多相流模型,其中大尺度气液交界面由流体体积 (VOF)方法捕捉,小液滴由拉格朗日粒子模型 (LPP)解析,将数值模拟得到的结果与直接数值模拟 (DNS)和试验数据进行比较来进行定量验证。

目前国内外有关双级旋流空气雾化喷嘴的研究主要集中在油气比、供油压差等对流场、喷雾场的影响等方面,但对双级旋流空气雾化喷嘴中的旋流器型式对空气雾化喷嘴流场和油雾特性影响方面的研究较少。本文为了研究不同旋流器型式对双级旋流式空气雾化喷嘴的油雾特性的影响,采用高速摄影仪和激光粒度分析仪,对不同空气流量和燃油流量下的双级旋流空气雾化喷嘴的油雾场形态、SMD、分布指数进行试验研究;同时借助数值计算方法对燃油初次雾化后形成的液滴,被旋流器形成的空气流场携带并且发生二次雾化的过程进行了数值模拟,所获得的研究成果为双级旋流空气雾化喷嘴的优化设计提供帮助。

1 研究对象

本文研究的双级旋流空气雾化喷嘴结构如图 1 所示。该空气雾化喷嘴由中心布置的双油路离心喷嘴和与离心喷嘴配合安装的一级旋流器、文氏管、二级旋流器和套筒组成。

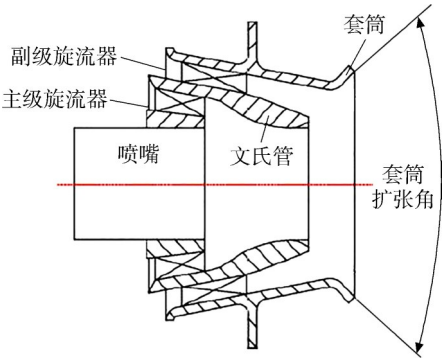


图1 双级旋流空气雾化喷嘴示意图
Fig.1 Schematic diagram of dual-stage swirl air blast atomizer

在这种雾化装置中,燃油从离心喷嘴喷出后,一部分在文氏管内表面形成油膜,并在一、二级旋流空气相互剪切作用下进一步气动雾化,另一部分不会打到文氏管上而是直接随着一级旋流器的气流流出文氏管。套筒的出口扩张角可以控制喷雾锥角度,扩张角太小会使油气之间相互作用不充分,影响雾化质量,产生细而长的燃烧火焰;扩

张角太大会使火焰筒头部中心回流区长度缩短,产生短而粗的燃烧火焰。两级旋流器可有不同类型,如两级轴向旋流器、两级径向旋流器以及斜切径向旋流器等。

双级旋流式空气雾化喷嘴的工作原理可以分为直接喷射和间接喷射^[17]。

1) 直接喷射。中心喷嘴喷出的燃油不会打在文氏管壁面上,而是直接进入一级旋流器形成的旋流空气中,这种情况可以有效避免已经雾化很好的油雾冲击在文氏管上后又积聚成油膜后再次雾化。一般在供油压力较大,此时喷嘴本身雾化效果较好,喷出的粒径较小的油滴有较好的跟随性,将随着一级旋流器产生的气流流出,并且不会打在文氏管上,此时双级旋流式空气雾化喷嘴的雾化效果主要取决于喷嘴本身的雾化效果。

2) 间接喷射。中心喷嘴喷出的燃油冲击在文氏管内壁面上,形成一层连续的油膜,这层油膜在气动力的作用下向文氏管下游流动。在文氏管的末端,油膜在一级旋流空气和二级旋流空气的互相剪切作用下破碎成液条液带,形成初次雾化,被卷入内外旋向相反的两股旋流剪切层中的燃油,会在气动力的作用下进一步雾化形成油雾。这种情况一般是在喷嘴供油压力较小时,喷嘴本身雾化效果较差,从喷嘴出口喷出的油滴或者是液块体积较大,惯性大,跟随性较差,大部分液滴会被甩到文氏管上。这种情况下的双级旋流式空气雾化喷嘴的雾化效果主要取决于两级旋流器产生旋流的空气雾化效果。

本文主要研究不同旋流器型式(双级轴向和双级径向)对双级旋流式空气雾化喷嘴流场和油雾特性的影响规律,所研究的双级轴向旋流器和双级径向旋流器结构示意图如图 2 和图 3 所示,具体参数见表 1,其中 S 代表旋流数, A 代表旋流



图2 双级轴向旋流器
Fig.2 Dual-stage axial swirler



图3 双级径向旋流器

Fig.3 Dual-stage radial swirler

器流通面积, R 代表旋流器叶片旋向, 下标 1 代表一级旋流器, 下标 2 代表二级旋流器。从表 1 可见, 两种型式的旋流器其旋流数和流通面积比相近, 旋向组合相同。

表 1 两种不同旋流器参数

Table 1 Parameters of two different swirler types

参数	双级轴向	双级径向
S_1	0.73	0.60
S_2	0.95	0.99
A_1/A_2	0.66	0.62
R_1	—	—
R_2	+	+

注: 表中“+”代表顺时针, “-”代表逆时针。

2 试验系统与测量方法

2.1 试验系统

试验系统示意图如图 4 所示, 整个试验系统由气源、转接段、整流段、稳压段、核心测量段以及尾气处理段等组成。

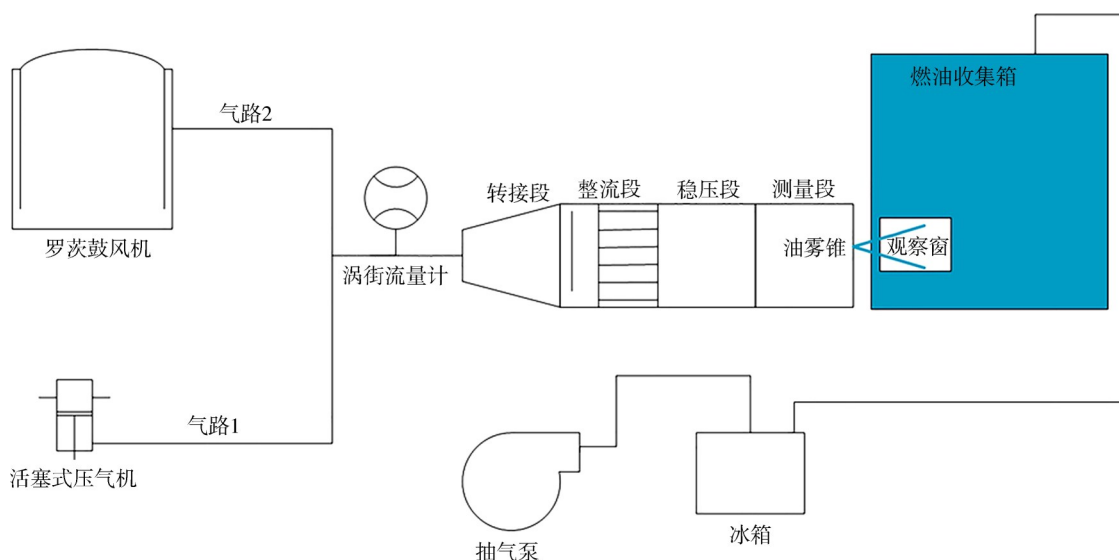


图4 试验系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of experimental system

气源部分为了满足空气流量的稳定, 大工况和小工况分别采用两套进气管路。气流从压气机流出以后经过不同的转接段进入不同量程范围的两个涡街流量计(分别用于气路 1 和气路 2 进气流量测量)测量进口空气的体积流量, 后经过转接段到达试验段所需的管道, 再经过整流段和稳压段进入进口气流参数测量段, 进口空气经过主燃烧室头部双级旋流器形成旋转气流, 对双油路离心喷嘴喷出的燃油进行气动雾化, 经试验测量后的油珠进入燃油收集箱, 大量液体油珠被燃油收集箱收集起来, 并排入集油桶收集, 空气中剩余的

细小油珠和蒸发的燃油蒸气伴随旋流空气被收集箱下游上方的抽气管道吸走, 经过冰箱中的换热器冷凝后处理变为液体煤油并被收集排出, 经处理后的空气被排气泵吸走排入大气中。

2.2 测量方法

试验过程中为了测量双级旋流器出口中心截面的油雾锥形态和油雾锥角, 本文采用片激光从燃油收集箱尾部通过提前开好的缝隙中打光, 照亮油雾锥的中心截面(见图 5 所示), 从收集箱两侧的窗口垂直于照亮截面布置高速摄影仪进行拍摄。拍摄曝光时间为 $4\ 997\ \mu\text{s}$, 拍摄频率为 200

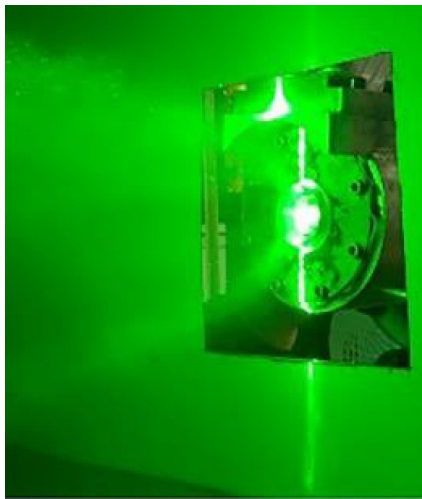


图 5 拍摄截面示意图
Fig.5 Schematic diagram of the shooting section

Hz,对于每个工况都拍摄 100 张照片后进行图像后处理。拍摄范围为 84 mm×84 mm 的区域。

为了得到清晰、统一标准的油雾锥边界,本文使用 Matlab 软件对高速摄影仪拍摄得到的同一工况下 100 张原始灰度值图片进行平均处理和边界识别处理。图 6 为高速摄影仪拍摄得到的原始照片,对每组 100 张原始照片,同一像素位置上的灰度值叠加后取平均就得到了所有照片组灰度值平均的结果如图 7 所示,横坐标 x 为旋流器下游水平轴线方向位置,纵坐标 y 为旋流器纵向高度方向位置。为了提取油雾边界,文献[18]采用阈值法,选择合适的灰度值阈值对图像进行二值化处理然后得到油雾锥的边界,但这种方法在使用过程中会出现很多问题,阈值的选取对于结果影

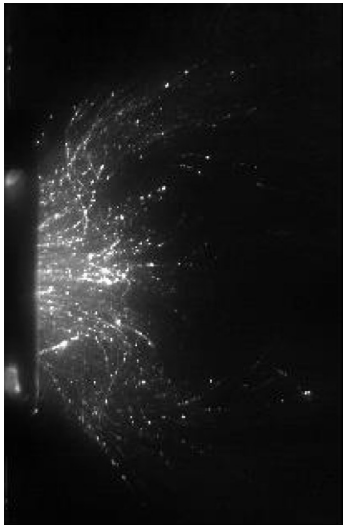


图 6 雾化原始图片
Fig.6 Original picture of atomization

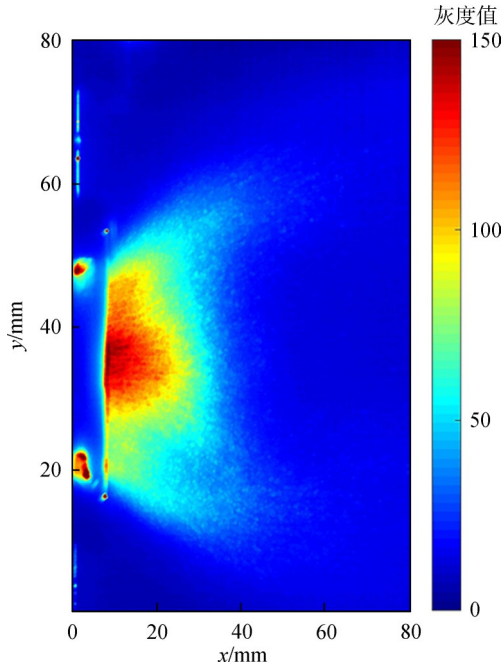


图 7 灰度平均照片
Fig.7 Grayscale average picture

响较大,并且随着工况的变化,下游油雾的细密程度使得片激光照亮区域的亮度有较大变化,此时不同工况下的油雾形态亮度差异较大,使用统一的阈值无法满足所有工况下油雾锥的测量要求。本文使用 Matlab 软件对灰度值平均的照片划分全场灰度值的等值线,图 8 为采用等值线方法做出的将全场灰度值 20 等分得到的全场等值线图

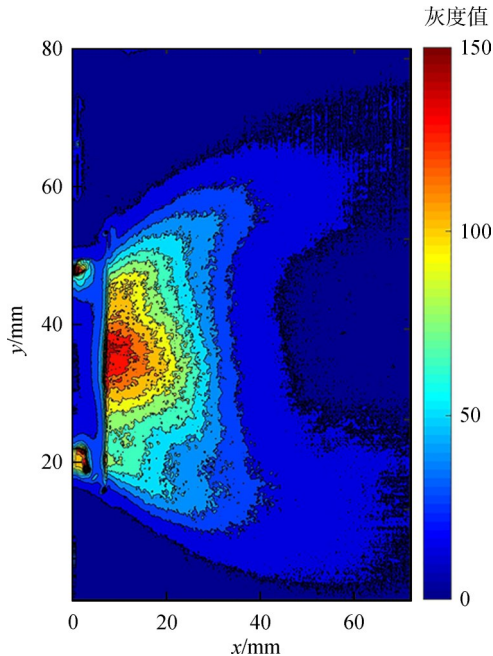


图 8 灰度等值线照片
Fig.8 Grayscale contour picture

像,将最外层代表最大灰度值 1/20 的等值线作为本文油雾形态的边界。

对于油雾锥角的定义,本文采用出口雾化角,在喷嘴的出口,作雾化边界的切线,两根切线的夹角即为出口雾化角。

粒径分布的测量,采用马尔文粒度仪测量位置距离旋流器出口 35 mm 处平均 SMD 大小。马尔文粒度仪测量激光垂直于油雾锥中心线,因此所获得的 SMD 为激光穿过测量直线上所有油珠的 SMD。对每个工况测量 3 次,最后记录 3 次 SMD 测量值的平均值,从而减少测量误差。

3 试验结果与分析

试验将相同的压力雾化喷嘴,分别安装在双级轴向旋流器或双级径向旋流器上,组成双级旋流空气雾化喷嘴,在 3 个不同的燃油流量和 9 个不同旋流器进出口总压损失下进行雾化特性试验测量,试验测量工况如表 2 所示。其中 Δp 为旋流器进出口总压差, p_{in} 为进口总压, W_f 为燃油质量流量(文中简称流量), $\Delta p/p_{in}$ 则表示旋流器进出口总压损失的百分比。

表 2 试验工况

Table 2 Experimental condition

参数	数值
$W_f/(g/s)$	1.5, 2.3, 7.5
$(\Delta p/p_{in})/\%$	0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7

3.1 流场结果

为了分析两种类型旋流器对燃油雾化的雾化原理,本文首先对表 2 中不同进出口总压损失情况下,两种类型旋流器下游的中心截面流场进行了 PIV 试验测量。两种旋流器类型的空气流场的典型试验结果如图 9 所示,不同进出口总压损失条件下的轴向零速度线如图 10 所示。

试验结果表明:随着进出口总压损失的增加(进口流量增加),两种头部结构下游的空气流场结果在结构上变化不大,只是速度大小有所变化;两种类型旋流器 PIV 试验结果,从中心回流区的大小来看,轴向旋流器组合中心回流区范围要大于径向旋流器组合所形成的中心回流区;从形状来看,径向旋流器形成的中心回流区饱满,而轴向旋流器形成的中心回流区为纺锤状;从回流区的位置上来看轴向旋流器和径向旋流器形成的空气

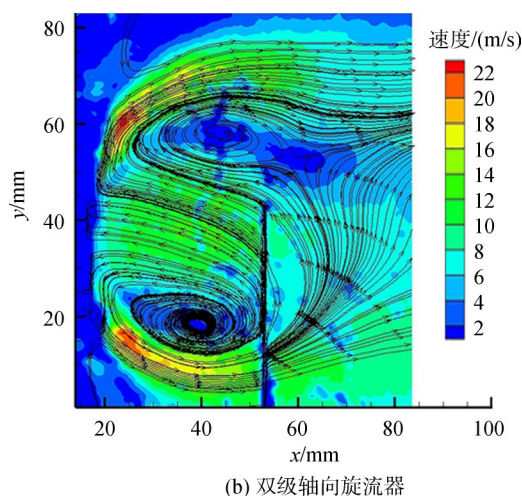
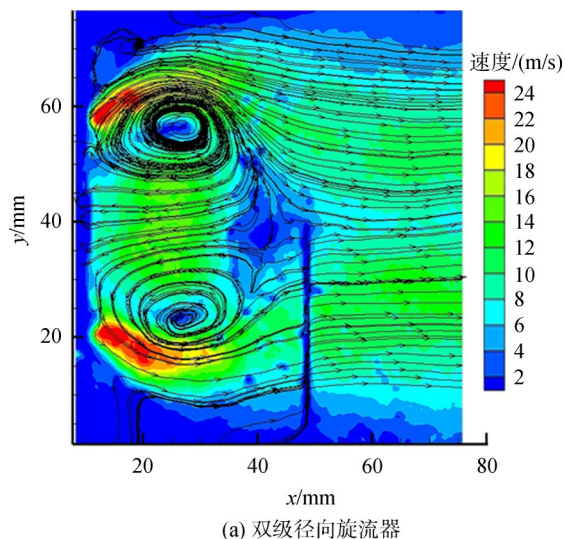
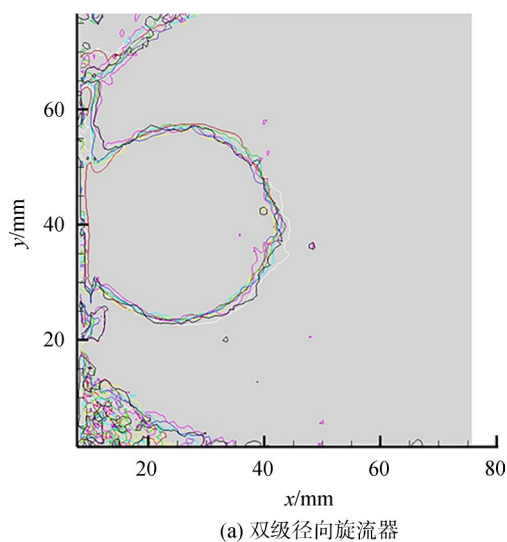
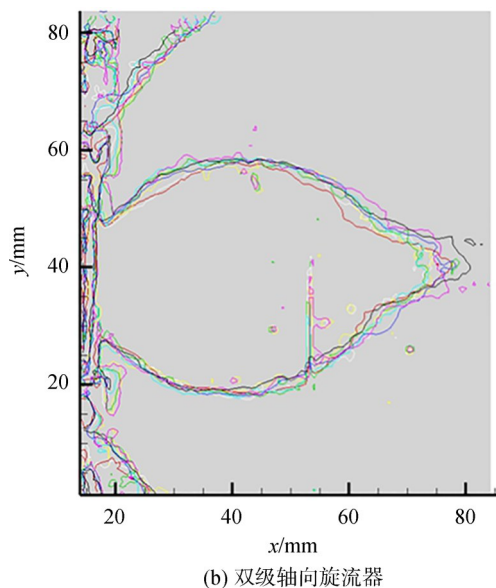


图 9 $\Delta p/p_{in} = 3\%$ 时 PIV 流场测量结果

Fig.9 Flow field measurement results by PIV
at $\Delta p/p_{in} = 3\%$



图10 不同 $\Delta p/p_{in}$ 下轴向零速度线Fig.10 Axial zero velocity line at different $\Delta p/p_{in}$

流场回流区都是从套筒内部开始。

3.2 雾化形态

双级径向旋流器和双级轴向旋流器随着进出口总压损失 ($\Delta p/p_{in}$) 和燃油流量 (W_f) 的变化,雾化形态有明显的变化,如图11所示。

图11为双级径向旋流器典型的雾化形态原始图片,结果显示:首先在燃油流量和总压损失都较小时燃油以液条、液带的形式存在(图11(a)与图11(d)),此时油雾锥的边界呈现出一定的随机分布,没有清晰的边界,因此本文将该状况下油雾锥角度记为 0° ;然后随着进出口总压损失增大,喷嘴出口喷出的大液滴在气流的剪切下逐渐破碎为小液滴(图11(b)与图11(e)),越靠近下游,液滴发生二次破碎,粒径明显减小,而小液滴对激光的散射较弱,因此在照片中显示的亮度较低;并且小液滴跟随性较好,受流场的影响较大,所以在后半段油雾锥角有收缩趋势,而不是继续保持出口的油雾锥角度运动(图11(c)与图11(f));这种情况下在图像处理后可以观察到较为明显的油雾边界,呈现一定的锥角,并且油雾锥边界在后半段能观察到明显的收缩趋势;在燃油流量较大时,供油压力较大,压力雾化喷嘴本身有较好的雾化效果,即使没有气动力的辅助在较小的进口空气流量下雾化效果也较好(图11(g)),在照片中并没有明显的还没来得及破碎的大液滴,并且此时油雾锥呈现出空心锥的形态,在边界附近的油滴分布较为密集、亮度较大,油雾锥内部的亮度较低、油滴数量

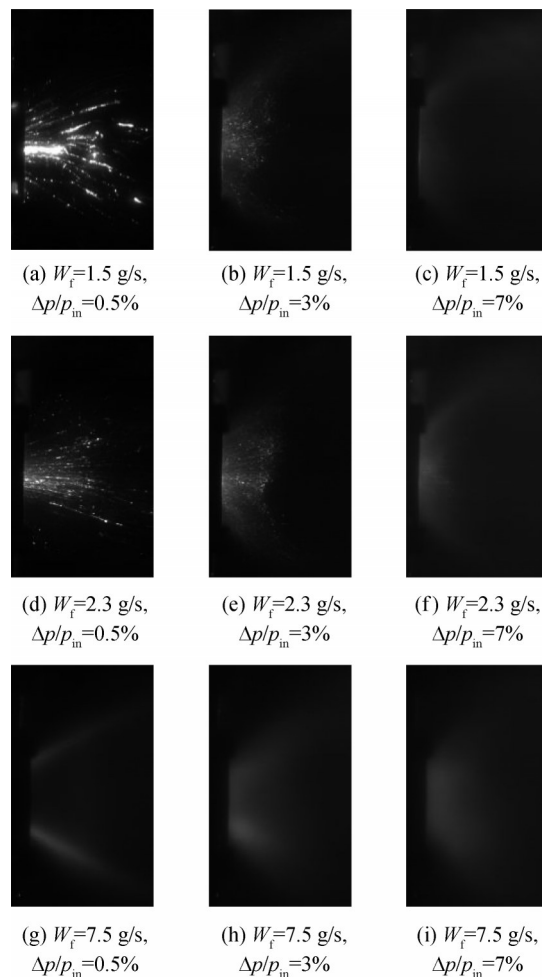
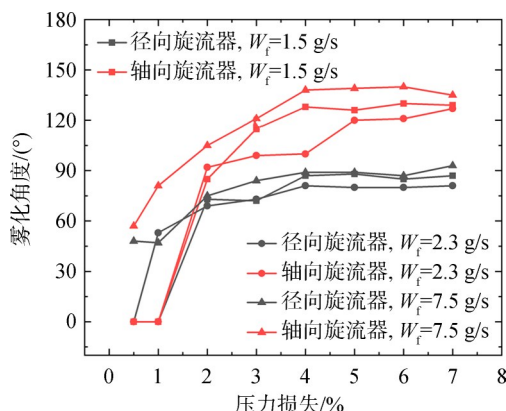


图11 径向旋流器典型工况下的雾化形态

Fig.11 Atomization form of radial swirl atomizer at typical working conditions

较少。随着进口空气流量的增加,可以观察到油滴的粒径在气动力的作用下进一步减小,油雾锥角度变大(图11(h)与图11(i)),但与此同时油雾边界变得模糊,这是因为识别到的粒子较小,而且在油雾边界处的液滴与气流接触,在气动力的效果下继续破碎产生更为细小的液滴,这些液滴被空气带到头部的各个位置导致油雾锥范围较大,油雾与空气之间的边界变得模糊。

图12是统计得到的各工况下油雾锥角随进出口总压损失的变化趋势图。从图中可以明显看出双级轴向旋流器与离心压力雾化喷嘴的组合喷嘴在雾化角度上比双级径向旋流器组合喷嘴明显要大,这是因为液滴从喷嘴喷出后将会与周围空气进行动量交换,液滴的运动轨迹主要受喷嘴喷出的初速度以及空气流场的影响,而轴向旋流器的流场回流区范围和射流角度比径向旋流器要大,因此轴向旋流器相比径向旋流器有更大的雾

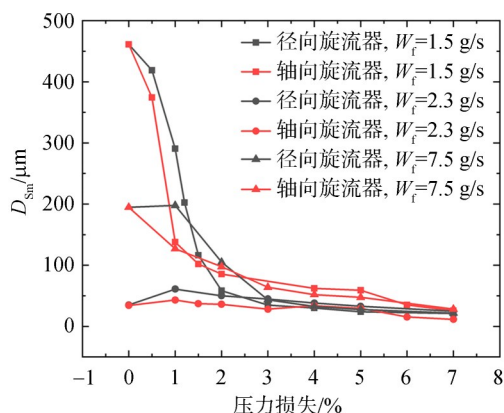
图 12 雾化角度随 $\Delta p/p_{in}$ 变化Fig.12 Atomization angle varies with different $\Delta p/p_{in}$

化角度。

从图 12 中同样可以发现:各工况下的油雾锥角度都是随着进出口总压损失的增大呈现先增大、后逐渐平稳的变化趋势。这同样是因为在进出口总压损失较小时油雾锥呈现出喷嘴原始的喷雾形状,然后随着进出口总压损失增加,气动力效果逐渐增加,一方面与液滴之间的动量交换剧烈,液滴速度方向发生变化,导致油雾角度增加,并且由于气动雾化加剧油滴破碎,小的液滴具有更好的跟随性从而随流场运动到更远的区域,使油雾锥角度增大。双级轴向旋流器相比双级径向旋流器,雾化角度为 0° 的情况出现较少,说明双级轴向旋流器在空气流量较小时就能形成有效的油雾锥角,雾化效果较好。

3.3 SMD 与分布指数

图 13 为各工况下测量得到的距离旋流器出口中轴线 35 mm 处的 SMD 大小随进出口总压损失的变化规律。由于采用相同的离心雾化喷嘴,因此当旋流器进出口总压损失为 0 时此时,没有

图 13 SMD 随 $\Delta p/p_{in}$ 变化Fig.13 SMD varies with different $\Delta p/p_{in}$

空气经过旋流器对下游的油雾场进行气动雾化作用,因此两种结构进出口总压损失为 0 处的各燃油工况下的 SMD 测量结果相同。

由图 13 可知,在不同工况条件下试验测得的 SMD 总体呈现出随着进出口总压损失的增大而逐渐减小、后趋于稳定的变化趋势。在进出口总压损失较低时,随着总压损失的逐步增加 SMD 先变化较小甚至有所上升,这一现象在轴向旋流器燃油流量为 7.5 g/s 的低总压损失工况下和径向旋流器为 2.3、7.5 g/s 的低总压损失工况下较为明显。这是因为此时喷嘴本身的雾化性能较好,燃油从喷嘴出口喷出后油滴带有一定的初速度,但在低进出口总压损失情况下油滴本身的初速度比旋流器产生的旋流空气要大,所以在进出口总压损失逐渐增大的过程中,气液相对速度反而减小,这使得液滴受到气动力的剪切效果变差二次破碎的效果变差,从而导致在低总压损失情况下随着进出口总压损失增大 SMD 不减反增。总的来说,双级轴向旋流器在进出口总压损失较低时相比双级径向旋流器 SMD 更小,但这一差距随着进出口总压损失的上升差别减小,当进出口总压损失较大时两种结构的 SMD 都稳定在 $20 \mu\text{m}$ 左右的较细的水平。

图 14 和图 15 是不同工况下的双级径向旋流器和双级轴向旋流器测得的油滴粒径分布指数 N 随进出口压力损失的变化规律,分布指数 N 越大表示粒径尺寸分布越均匀,分布指数 N 越小表示粒径尺寸分布越不均匀。可见,径向旋流器头部和轴向旋流器头部的分布指数变化规律有较为明显的差异,径向旋流器头部的分布指数在所有燃油工况下都随着进出口总压损失的增大而表现出先迅速减小后逐渐稳定的趋势;而轴向旋流器头部在所有的燃油工况下随着进出口总压损失增大,分布指数先迅速减小后逐渐增大。

综合 SMD 与分布指数的变化结果可以得到径向旋流器与轴向旋流器雾化机理上的不同:

对于径向旋流器:燃油流量和进出口总压损失较小时,喷嘴的一次雾化对头部油雾场的形成有很大影响,形成了 SMD 较大、分布指数也较大的油雾场。这是因为此时供油压力较低,喷嘴本身雾化效果较差,喷嘴一次雾化形成的油滴粒径较大、且基本没有形成完整的雾化,此时只有较少数量的小液滴直接随着一级旋流气流出文氏管,大部分尺寸较大的液滴都被甩到了文氏管上

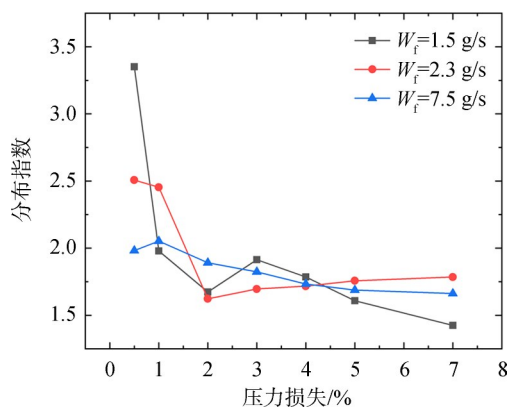


图 14 径向旋流器分布指数

Fig.14 Distribution index of the radial swirler

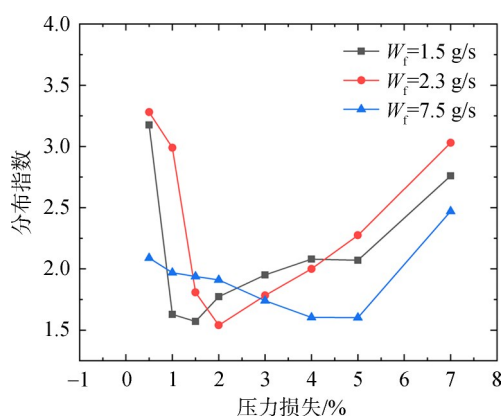


图 15 轴向旋流器分布指数

Fig.15 Distribution index of the axial swirler

形成油膜,而此时因为空气流量较小,一级旋流器处的气流速度较低,大液滴在文氏管上浸润长度较大,液膜比较均匀,且此时空气流量较小气流速度小,空气的剪切效果有限,气动雾化效果较弱,因此最终测量得到的油雾粒径特征为SMD较大、但分布较为均匀的大尺度液雾。当进出口总压损失增大,一级旋流的流量增大,通过一级旋流器的气流能携带的粒子数量增多,且能携带的粒子粒径增大,甩到文氏管上成膜进行空气雾化的粒子减少。此时空气流速较快,这部分粒子在空气剪切力的作用下发生气动雾化,此时气流具有破碎更小的液雾粒子的能力,不仅使粒子直径减少,也导致液雾群各粒子尺寸分布更宽广、更不均匀,因此下游测得的油雾的SMD减小、且分布指数减小。在燃油工况较大时,喷嘴本身雾化质量已经很好,增大进气流量对雾化质量改善不大,SMD和 N 值有稍许减少、但变化不大。径向旋流器的分布指数变化趋势表明,在所有工况下采用双级径向旋流器的空气雾化喷嘴的雾化主要是依

靠离心喷嘴本身起主导作用,空气雾化的效果有限,随着空气流量的增加,对雾化SMD大小和分布指数影响不大。

对于轴向旋流器:分布指数的变化与径向旋流器相比有较大变化,分布指数随着进出口总压损失的增大呈现着先减小、后增大的变化规律,且对于各燃油工况,分布指数变化的临界点位置不同,在1.5 g/s的燃油工况下临界进出口总压损失点为1.5%、2.3 g/s的燃油工况临界进出口总压损失点为2%、7.5 g/s的燃油工况临界进出口总压损失点为4%,分布指数由减小变化为增大的临界点位置随着燃油流量的增大而增大。分布指数的变化规律表明轴向旋流器头部在较小进出口总压损失时是依靠离心喷嘴本身的一次雾化占主导地位,此时空气速度不大,甩到文氏管上的液滴受到了气动剪切力的空气雾化效果较差,SMD虽然减小,但液滴分布范围变广, N 值减小导致液雾均匀性变差。随着进出口总压损失的增大,空气速度进一步提高,文氏管内外的反向旋转气流剪切效果增强,气动力增强,气动雾化逐渐占主导作用,文氏管上形成的液膜二次雾化效果变好,气动雾化产生了细小且分布均匀的液雾(这一点也在油滴速度分布的结果中得到了证实),从套筒出来的液滴均匀、且粒径较小,因此做回流运动的液滴回流范围起点在套筒出口处。分布指数变化的临界点位置随燃油流量的增大而增大,这是因为燃油流量增大,喷嘴本身雾化性能有所改善,喷嘴本身形成了分布范围较广的液雾,并且液滴从喷嘴喷出的初速度增加,因此在较小的进出口总压损失下空气流速的增加可能反而使气液相对速度减少,空气雾化效果甚至恶化。只有当进出口总压损失进一步增大,空气雾化效果才逐渐占主导地位。

4 数值模拟结果与分析

4.1 数值计算方法验证

试验研究是传统的研究燃油雾化特性的方法,通过光学测量设备可以得到液滴的粒径、速度等主要参数。但由于气液雾化机理的复杂性、液滴破碎的微观性以及燃烧室内结构越来越复杂,对于两级旋流器匹配压力雾化喷嘴的雾化机理,本文同时使用数值模拟的方法进一步解释双旋流空气雾化喷嘴空气流场对油雾场的影响规律,并对上文提到的诸多解释提供相关证明。本文数值

计算对象为双级轴向旋流器结构,计算模型如图 16 所示,数值计算模型与试验对象完全相同。

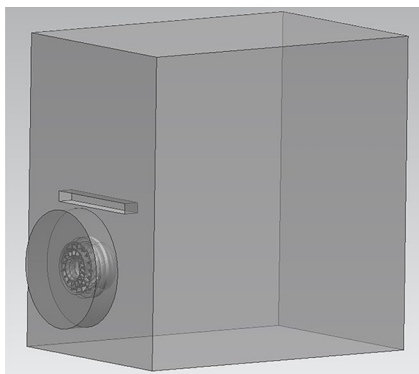


图 16 数值计算几何模型

Fig.16 Geometry model for numerical calculation

本文的油雾场计算中空气流场采用非稳态方法计算,压力速度耦合方式采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equation)求解器,压力采用 2 阶精度,动量方程、能量方程均采用 2 阶迎风差分格式,湍动能和湍流耗散率采用 1 阶迎风。燃油粒子追踪采用拉格朗日 DPM 方法,DPM 设置采用空气与粒子双向耦合,考虑粒子喷出后在气动力作用下发生二次雾化,采用的二次雾化模型为 KHRT (Kelvin-Helmholtz and Raveigh-Taylor)模型,曳力模型采用动态阻力模型,采用喷嘴模型中的压力旋流雾化喷嘴模型对双油路离心喷嘴的副油路进行模拟,给定供油压力、喷嘴出口直径、喷嘴位置等,具体设置如表 3 所示,其中雾化锥角为本喷嘴在无空气伴流情况下试验测量得到的油雾锥角。

本文的数值计算思路为:燃油雾化的初次雾化过程通过压力旋流雾化喷嘴模型设置中的参数拟合,拟合得到喷嘴初次雾化的破碎距离和初

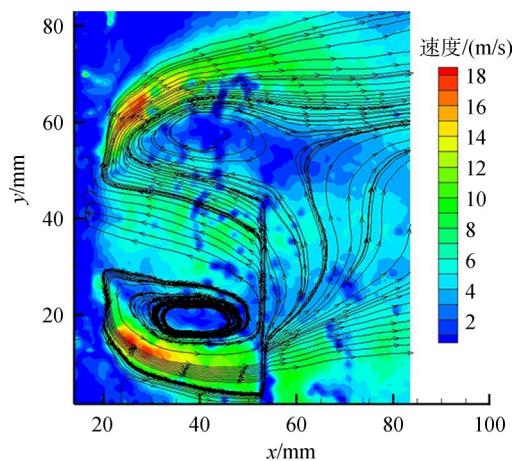
表 3 喷嘴模型设置

Table 3 Model setting of the nozzle

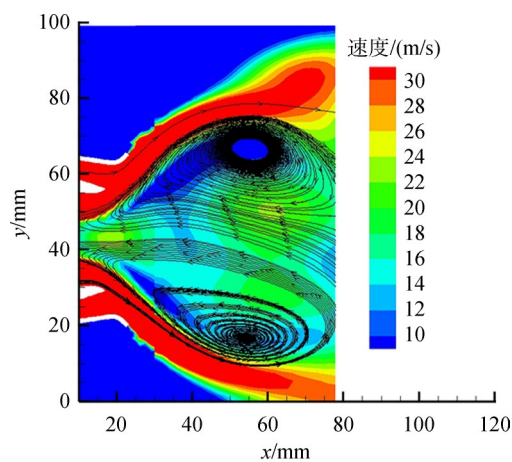
参数	数值
供油绝对压力/Pa	401 325
喷嘴流量/(g/s)	7.5
喷嘴出口直径/mm	0.98
雾化半锥角/(°)	33
液流破碎常数	12
线性液膜常数	0.5
雾化分布指数/(°)	2

始粒径,二次雾化过程通过二次雾化模型进行模拟。

数值计算得到的流场与油雾场均与试验测量的结果符合得较好。图 17 和图 18 是数值计算得到的空气速度场和特征位置处的速度大小与 PIV 试验测量的数据对比,从图中可以看出,本文数值计算方法获得的流场结果与 PIV 试验结果吻合较好。



(a) PIV测量结果



(b) 数值计算结果

图 17 流场结构对比

Fig.17 Comparison of flow field structure

图 19 是数值计算的油雾形态与拍摄得到的油雾形态对比。可以看到数值计算的结果在油雾场形态上与试验符合得较好。并且统计了试验测量相同位置的 SMD 结果与数值计算结果定量比较,如表 4 所示,对比发现数值计算的结果与测量值符合得较好。

综上所述,数值计算结果与试验结果吻合较

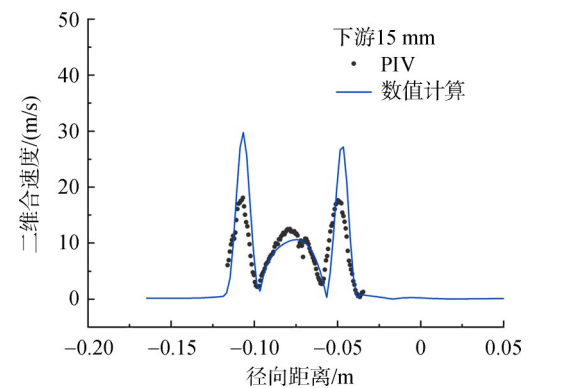


图 18 特征直线上的速度大小对比
Fig.18 Comparison of the value of velocity at characteristic line

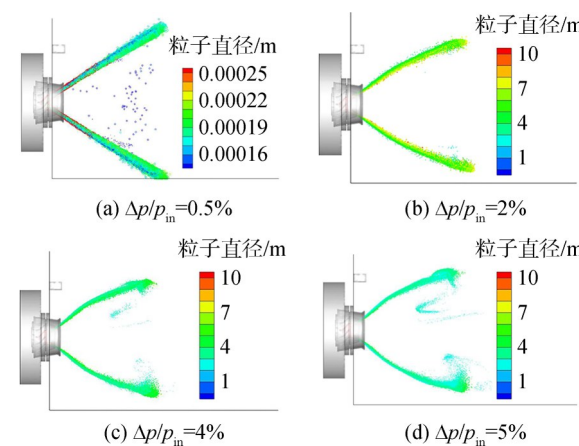


图 20 不同 $\Delta p/p_{in}$ 下的油滴分布
Fig.20 Droplet distribution at different $\Delta p/p_{in}$

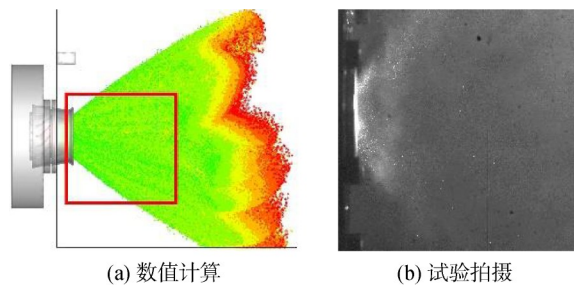


图 19 油雾形态对比
Fig.19 Comparison of atomization form

表 4 SMD 结果对比

Table 4 Comparison of SMD results		
$(\Delta p/p_{in})/\%$	$D_{sm}/\mu m$	
	PIV	CFD
1	58.5	55.1
2	44.1	44.7
3	33.9	37.4
4	28.0	33.1

好,说明本文采用的数值计算方法可用于模拟双旋流空气雾化喷嘴雾化过程。

4.2 数值计算结果

图 20 为数值计算双级轴向旋流器在不同进出口总压损失下的油滴空间分布,从图中可以明显观察到:在进出口总压损失较低,空气流量较小时,油珠粒子从喷嘴喷出后油雾锥角度基本不变,油滴主要受到从喷嘴喷出的初速度的影响,在向下游发展的过程中,油滴破碎效果有限,整体粒径稍稍减小。随着空气流量增大,油雾锥在下游有明显的收缩趋势,且油雾锥中心开始出现被空气回流卷入的较小的油珠粒子。

为了研究旋流器出口流场对油滴破碎的影响规律,图 21 为轴向旋流器组成的双级旋流空气雾化在燃油流量为 7.5 g/s、旋流器进出口总压损失为 4% 时数值模拟得到的中心截面上的空气速度云图与油滴粒子轨迹图,从图中可以看出燃油从喷嘴出口喷出后油雾锥角度有明显收缩,并且油雾锥的边界与旋流器出口的高速射流方向基本吻合,而下游出现有小液滴被卷入油雾锥内部的位置也与流场回流区最大的位置一致。

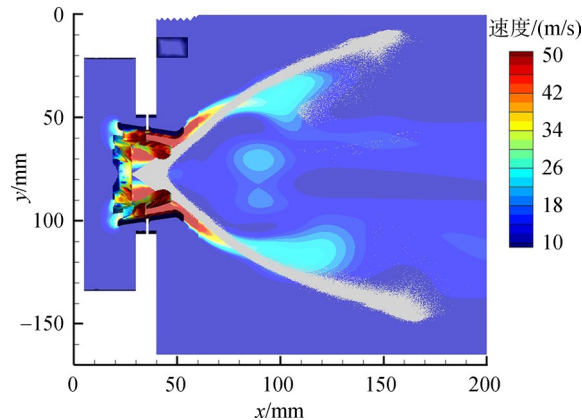


图 21 空气速度云图与油滴粒子轨迹图
Fig.21 Cloud diagram of air velocity and particle trajectory diagram of oil droplet

综上,本文采用计算方法解释了燃油经初次雾化所形成的油珠,被旋流器形成的空气流场携带并且发生二次雾化的物理过程。液滴从喷嘴喷出后具有一定的初速度和喷射角度,在进出口总压损失较小时,空气流速较小,空气与液滴之间的动量交换较小,液滴的运动方向基本没有明显变化。随着进出口总压损失的增大,经过旋流器的空气速度增加,空气与液滴之间的动量交换和气

动雾化效果增强,动量交换的增强导致液滴的运动方向与旋流器出口高速射流的方向基本靠近。同时气动雾化效果的增强使液滴发生二次破碎形成了更为细小的液滴,并且越靠近下游液滴的粒径越小,小的液滴有更好的跟随性,因此容易受到回流区中旋涡的影响而产生回流的现象。

5 结 论

本文针对离心喷嘴与不同类型的双级旋流器组合,通过试验方法研究双级轴向旋流器和双级径向旋流器对组合喷嘴的流场与油雾场形态、SMD和分布指数 N 的影响规律,并且通过数值模拟方法对双轴向旋流空气雾化喷嘴的雾化原理进行探究。得到了如下结论:

1) 两种类型旋流器结构的组合喷嘴的雾化锥角都表现出随旋流器进出口总压损失的增大而先增大后逐渐稳定的趋势;在相同的工况条件下,轴向旋流器的雾化锥角会稍大于径向旋流器。

2) 对于采用双级径向旋流器的双旋流空气雾化喷嘴主要是离心喷嘴本身起主导作用,空气雾化的效果有限,随着旋流器进出口总压损失的增加,SMD先减小后变化不大,分布指数也随之先减小后变化缓慢,这种结构空气雾化的效果有限;对于双级轴向旋流器的双旋流空气雾化喷嘴,随着旋流器进出口总压损失的增加,SMD先减小后变化较小,分布指数先减小后增大;轴向旋流器头部的雾化在进出口总压损失较小时是离心喷嘴本身的一次雾化占主导地位,在进出口总压损失进一步增大后气动雾化效果起主要作用。

3) 对轴向旋流器的油雾场进行了数值模拟,数值模拟结果与试验符合较好,说明本文采用的数值计算方法合理可行。

4) 利用数值计算结果,解释了燃油初次雾化所形成的油珠被旋流器出口的空气流场携带并且发生二次雾化的物理过程。随着进出口总压损失的增大,从旋流器中流出的空气与液滴之间的动量交换以及气动雾化效果显著增强,从而导致了雾化形态以及SMD的变化。

参考文献:

[1] MONGIA H, AL-ROUB M, DANIS A, et al. Swirl cup modeling: I [R]. Cambridge, US: the 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2001.

[2] 刘存喜.多级旋流空气雾化喷嘴雾化特性及光学测试方法研究[D].北京:中国科学院,2012.

LIU Cunxi. Investigations of spray characteristics and optical measuring methods for multi-swirl air-blast atomizer[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)

[3] 张弛,张荣伟,徐国强,等.直射式双旋流式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)

[4] 徐华胜,黄义勇,王秀兰.喷嘴供油特性对双涡流器头部气动雾化效果的影响研究[J].燃气涡轮试验与研究,2004,17(2):14-17.

XU Huasheng, HUANG Yiyong, WANG Xiulan. Study on the effect of fuel jet characteristics on airblast atomization performance for device with two-stage swirler[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2):14-17. (in Chinese)

[5] 王志凯,陈盛,刘冉,等.双级轴向旋流杯气量比对雾化性能影响的试验[J].航空动力学报,2019,34(12):2656-2662.

WHANG Zhikai, CHEN Sheng, LIU Ran, et al. Experiment on effects of airflow ration spray characteristics of dual-axial swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12):2656-2662. (in Chinese)

[6] 郭新华,林宇震,张弛,等.离心式同向双旋流器空气雾化喷嘴雾化特性研究[J].航空动力学报,2009,24(10):2249-2254.

GUO Xinhua, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experimental investigation on atomization characteristic of an airblast atomizer with centrifugal nozzle and co-dual-swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10):2249-2254. (in Chinese)

[7] 金仁瀚,刘勇,冯志鹏,等.双旋流燃烧室但头部油雾特性实验[J].航空动力学报,2014,29(2):250-258.

JIN Renhan, LIU Yong, FENG Zhipeng, et al. Experiment on spray characteristic of single head of dual-swirl cup combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2):250-258. (in Chinese)

[8] 陈俊,吉洪湖,张宝诚.双路离心喷嘴雾化特性的实验[J].航空动力学报,2010,25(4):774-779.

CHEN Jun, JI Honghu, ZHANG Baocheng. Experimental investigation of spray characteristics of a double line pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4):774-779. (in Chinese)

[9] 张善军,金戈,贾春燕,等.离心喷嘴偏心和凸凹对双旋流器空气雾化特性的影响[J].航空发动机,2015,41(4):65-68.

ZHANG Shanjun, JIN Ge, JIA Chunyan, et al. Effect of eccentricity and convex-concave for centrifugal nozzle on atomization characteristic of an airblast atomizer with dual-swirl cup[J]. Aeroengine, 2015, 41(4):65-68. (in Chinese)

[10] 康尧,林宇震,霍伟业,等.双级旋流杯结构变化对点火特性的影响研究[J].推进技术,2014,35(5):675-680.

KANG Yao, LIN Yuzhen, HUO Weiye, et al. Effects of hardware geometry of dual-stage swirl cup on ignition performance

- [J].Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(5):675-680. (in Chinese)
- [11] 于锦峰,郭志辉,张君锋,等.套筒长度对火焰筒流场和雾化特性的影响[J].航空动力学报,2009,24(11):2506-2513. YU Jinfeng, GUO Zhihui, Zhang Junfeng, et al. Experimental study the effect of flare sleeve length on the flowfield and spray characterization of a combustor swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(11):2506-2513. (in Chinese)
- [12] SUN Y, ALKHEDHAIR A M, GUAN Z, et al. Numerical and experimental study on the spray characteristics of full-cone pressure swirl atomizers[J]. Energy, 2018, 160(C):678-692.
- [13] YOO Y L, HAN D H, HONG J S, et al. A large eddy simulation of the breakup and atomization of a liquid jet into a cross turbulent flow at various spray conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 112:97-112.
- [14] 李营,陆欣.高温高压下燃油二次雾化特性的数值研究[J].柴油机设计与制造,2013,19(3):1-4. LI Ying, LU Xin. Numerical study of the secondary atomization characteristics of fuel under high-temperature and high-pressure[J]. Design and Manufacture of Diesel Engine, 2013, 19(3):1-4. (in Chinese)
- [15] HASSANI M A, ELKAIE A, SHAFARAE M. Numerical investigation of the full-cone spray structure and characteristics provided by a jet-swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(15):5788-5800.
- [16] LING Y, ZALESKI S, SCARDOVELLI R. Multi-scale simulation of atomization with small droplets represented by a Lagrangian point-particle model[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 76(1):122-143.
- [17] MEHDI B, ANDREALBERT D M, PIERRE-JEAN P S, et al. Aerodynamic fuel injection system for a gas turbine engine:US6035645[P]. 2000-03-14.
- [18] 王廷俊.基于视觉的航空油雾喷嘴雾化角度自动检测装置[J].中国设备工程,2018(3):94-96. WANG Tingjun. Vision-based automatic detection device for atomization angle of aviation oil mist nozzle[J]. China Plant Engineering, 2018(3):94-96. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)