

燃气轮机离心式燃油雾化喷嘴仿真

王红莲¹, 赵鼎义¹, 邵方琴², 郑高峰²

(1. 中国航发南方工业有限公司, 湖南 株洲 412002;

2. 厦门大学 仪器与电气系, 福建 厦门 361102)

摘 要: 开展离心式燃油喷嘴雾化仿真研究, 为燃气轮机燃烧提供依据。利用 Solidworks、ANSYS ICEM CFD 软件进行离心式喷嘴外场建模和网格划分, 基于 FLUENT 仿真完成不同压力工况下瞬态离心式喷嘴外流场数值模拟计算。对离心式喷嘴在无辅助空气作用下和有空气辅助作用下的外流场进行了数值模拟研究, 分析其在 13 个压力点工况下 (0.05 MPa、0.1 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa、2.5 MPa、3.0 MPa、4.0 MPa、5.0 MPa、6.0 MPa、7.0 MPa) 的雾化液滴分布以及性能参数的结果。研究表明: 在无空气辅助下, 喷嘴的雾化液滴分布都呈圆锥状分布, 喷嘴在压力点工况下的整体索尔平均直径 (SMD) 以及不均匀度的极大值 (极小值) 分别为 $414.54\ \mu\text{m}$ ($40\ \mu\text{m}$)、 $0.670\ 9$ ($0.487\ 4$); 在 3 个不同空气压力下 (10 kPa、14 kPa、20 kPa), 喷嘴的雾化液滴分布都呈圆锥状分布, 喷嘴在压力点工况下的整体 SMD 以及不均匀度的极大值 (极小值) 分别为 $35.93\ \mu\text{m}$ ($15.67\ \mu\text{m}$)、 $0.838\ 7$ ($0.704\ 0$)。本文的仿真研究为离心式燃油喷嘴应用到燃气轮机燃烧中提供了依据。

关 键 词: 离心式喷嘴; 雾化仿真; 空气辅助雾化; SMD; 不均匀度

中图分类号: TK472

文献标志码: A

文章编号: 1009-2889(2020)04-0017-07

随着环保意识的加强, 人们对燃气轮机低污染的排放要求不断提高, 而改变燃烧室喷嘴的雾化方式对燃气轮机燃烧系统的燃烧效率和污染排放有很大的影响^[1]。离心式喷嘴是燃气轮机广泛使用的雾化设备, 其雾化性能直接影响到燃气轮机的燃烧效率和排放指标, 如液滴直径、液滴速度、液滴分布状态等对燃气轮机的点火、稳定工作范围、燃烧效率、出口温度和废弃物排放等都有重要影响^[2-3]。目前, 国内外许多学者对喷嘴雾化过程进行研究分析。韩国汉阳大学的 Sayop Kim 等^[4]采用数值模拟和实验测量的方法对气流作用下生物柴油和柴油的雾化过程及雾化液滴破碎进行了研究分析。研究表明, 液体粘度和表面张力会阻碍液滴的破碎, 但液体粘性对一次雾化过程的影响并不大, 且在该过程中液滴的形状通常在

球体与椭球体之间变化。北京交通大学的 Yusong Yu 等^[5]运用了一种新型破碎模型对某燃油喷嘴高压下的雾化过程进行了数值模拟研究, 通过对比可以发现, 采用新模型仿真的喷雾形状跟原模型会有所不同, 且新模型的喷雾穿透距离更长, 喷雾中心附近的液滴尺寸也更大。Ishimoto Jun 等^[6]运用数值模拟的方法对直喷喷嘴的雾化过程进行了研究, 分析了液滴破碎和形成的过程, 以及雾化粒径、喷雾锥角、液膜破碎长度等雾化特性, 结合仿真的结果及雾化的相关理论, 对喷嘴的内流场分布状况、气液分界面情况及喷嘴内壁面切应力进行了理论研究分析。韩国国立釜山大学的 Young-Sam Shim 等^[7]基于 APTAB 和 LISA 破碎模型对不同背压下 (0.1 MPa、0.5 MPa、1.0 MPa) 的 Gasoline 发动机中压力旋流式喷嘴的雾化特性

收稿日期: 2020-07-05 改稿日期: 2020-07-16

基金项目: 深圳市科技创新委员会科技计划项目 (JCYJ20180306173000073); 广东省自然科学基金 (2018A030313522); 厦门市高校科研院所产学研切块化管理项目 (3502Z2019015); 中国航发自主创新专项资金项目 (ZZCX—2017—046)

作者简介: 王红莲 (1982—), 女, 湖南衡南人, 硕士, E-mail: 83879247@qq.com; 通信作者: 郑高峰 (1984—), 男, 福建泉州人, 博士, 主要研究方向为微纳制造, E-mail: zheng_gf@xmu.edu.cn。

进行了研究,研究表明,相比于背压 0.1 MPa,在背压 0.5 MPa 和 1.0 MPa 下的平均颗粒速度分别下降了 33.1% 和 49.5%,喷雾贯穿距离分别下降了 30.2% 和 50.1%,因此,高背压条件会影响喷嘴的雾化发展过程。目前对于喷嘴雾化的认识还不是很全面,设计出高雾化性能的喷嘴仍存在一些技术难题。

本文通过数值仿真研究离心式燃油喷嘴雾化特性,使用 FLUENT 仿真软件对研究喷嘴外流场在不同的燃油进口压力和空气进口压力下的工作状态进行了瞬态数值计算,得到了喷嘴外流场的液滴空间分布、SMD、距离喷嘴口 70 mm 处的不均匀度等相关技术指标,分析了燃油进口压力和空气进口压力对雾化指标的影响。

1 外流场数值仿真理论分析

燃油从喷嘴喷出后,首先会形成液膜,并进一步破碎成各种形状不同的液体微团结构,该过程为一次雾化阶段;而这些液体微团结构在外流场中的形态并不稳定,在与空气进一步相互作用的过程中会导致破碎、碰撞、合并等现象发生,从而变成更加细小的液滴,此时称为二次雾化阶段^[8-10]。该过程与空气动力、温度、液体表面张力及液体粘度等因素直接相关。因此,要想对离心式燃油喷嘴最终的雾化性能进行研究分析,就必须对其燃油喷嘴的外流场进行数值模拟计算。

通常而言,对于喷嘴外流场雾化过程的数值模拟计算大多数基于欧拉-拉格朗日法进行的,其仿真思路是先计算连续相的稳态流场,待流场稳定收敛后,再加入离散相燃油液滴进行相间耦合的瞬态模拟计算,其相间耦合计算过程如图 1 所示^[11-13]。

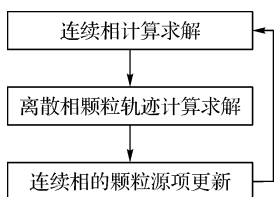


图 1 相间耦合计算过程

FLUENT 是一个用于模拟和分析复杂集合区域内的流体流动,应用于流体力学的 CFD 计算分析软件。雾化仿真除了要遵循物理守恒定律,还需要选择正确的模型,如湍流模型和多相流模型。本文使用 $k-\epsilon$ 湍流模型中的 RNG 湍流模型和多相流中的 DPM 模型。

(1) RNG $k-\epsilon$ 模型

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: ρ 是指密度, t 是指时间, k 是指湍流动能, ϵ 是指湍流耗散率, x_i, x_j 是指空间点的坐标, u_i 是指在时间 t 坐标 x_i 点的速度分量, $i=1,2,3$, μ_{eff} 是指有效黏度, G_k 是指速度梯度对湍动能 k 的影响,系数 $\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.39, C_{1\epsilon} = 1.42, C_{2\epsilon} = 1.68$ 。

(2) DPM 模型

单颗粒的运动控制方程:

$$m_k \frac{d\mathbf{v}_k}{dt} = \left(\sum F \right)_k \quad (3)$$

颗粒轨道方程:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{u}_p \quad (4)$$

颗粒的运动方程:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = f_d(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + f_x \quad (5)$$

式中: m_k 是指颗粒的质量, $\mathbf{v}_k$ 是指颗粒 k 的运动速度, $\left(\sum F \right)_k$ 是指颗粒所受的合力, $f_d(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)$ 是指单位颗粒质量受到的阻力, f_x 是指单位颗粒质量力, $\frac{\mathbf{g}_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ 是指单位颗粒质量的重力与浮力的合力, $\mathbf{u}$ 是指连续相速度, $\mathbf{u}_p$ 是指颗粒速度, ρ 是指连续相密度, ρ_p 是指颗粒密度。

2 雾化仿真

2.1 外流场模型建立和网格划分

离心式燃油喷嘴模型如图 2 所示,其燃油进口直径、喷嘴出口直径分别为 1.3 mm、14 mm。燃油受到进口压力的影响通过燃油喷嘴模型得到了燃油质量流量和雾化锥角,同时空气在不同的压力下(10 kPa、14 kPa、20 kPa)通过燃油喷嘴模型,在外流场形成强旋流的气体,为外流场的雾化仿真提供初始条件。对离心式燃油喷嘴的外流场进行几何建模,构建一个 1.5 m × 0.5 m 的圆柱型外流场模型。需要说明的是,在外流场模型的正中心有一个直径为 14 mm 的圆形进口,该进口与燃油喷嘴的出口相对应。模型比较简单,使用 ANSYS ICEM CFD 软件对其进行结构化网格划分。最终外流场模型的网格

数量为 38 万,如图 3 所示。

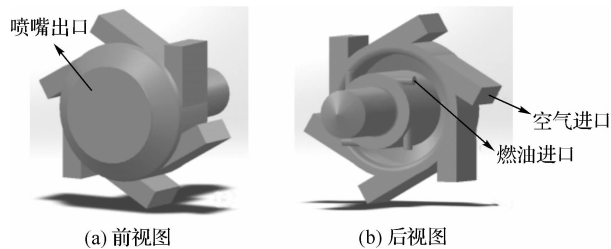


图 2 离心燃油喷嘴模型

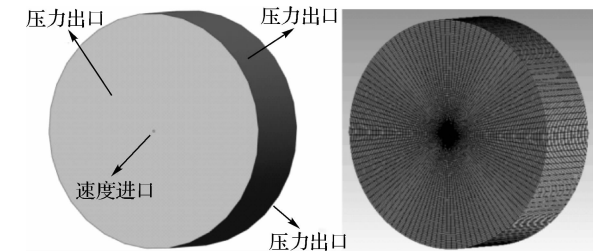


图 3 离心式喷嘴外流场模型及其网格划分

2.2 初始条件

在进行雾化仿真时,需要设置边界条件。燃油经过离心式喷嘴,可以由进口压力得到燃油质量流量和雾化锥角,其数据如表 1 所示。

表 1 燃油对应工况下的质量流量和雾化锥角

工况/ MPa	质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	锥角/ ($^{\circ}$)	工况/ MPa	质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	锥角/ ($^{\circ}$)
0.05	0.016 8	92	2.5	0.108 0	110
0.1	0.027 0	99	3.0	0.117 1	112
0.3	0.043 6	105	4.0	0.135 4	110
0.5	0.052 1	110	5.0	0.150 7	109
1.0	0.072 9	109	6.0	0.162 1	108
1.5	0.087 0	112	7.0	0.168 1	109
2.0	0.098 0	111			

空气在经过辅助空气流道时,由空气进口压力可以得到空气出口速度,如表 2 所示。

表 2 空气对应不同进口压力下的出口速度

进口压力/kPa	出口速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
10	92.34
14	110.10
20	131.92

2.3 无空气辅助数值计算

燃油喷嘴的外流场数值模拟计算主要是为了对二次雾化过程进行研究,分析其不同工况下的雾化液滴分布、SMD 及不均匀度等性能参数的情况。该仿真过程总的来说主要分为两步:先计算连续相的稳态流场,再加入离散相燃油液滴进行相间耦合的

瞬态模拟计算,因此必须用到离散相模型。整个仿真过程遵循能量守恒、动量守恒、质量守恒等相关定律,同时还包含湍流运动过程。由于本节是对无辅助空气作用下的外流场进行数值模拟计算,整个环境理论上处于无风状态,因此参考相关的数值模拟经验,在外流场的入口处设置一个 0.1 m/s 的空气流速模拟其连续相过程^[14]。在该过程中,操作压力为标准的大气压,进口采用速度进口条件,外流场四周均设为压力出口条件,出口压力设为大气压,其进出口边界条件设置如图 3 所示。当连续相的稳态仿真结束后,再打开离散相模型进行相间耦合的瞬态模拟计算。本文的离散相模型设置如下:

(1) 采用 DPM 模型进行瞬态模拟计算。将时间步长设为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}$,时间步数设为 1 600,共仿真 16 ms 的雾化过程;

(2) 考虑热交换过程,因此打开能量方程,同时采用 $k-\epsilon$ 湍流模型中的 RNG 湍流模型;

(3) 因为燃油和空气密度差别较大,因此打开重力选项;

(4) 外流场四周均设为压力出口条件,出口压力均设为大气压,同时离散相壁面条件都设为 escaped;

(5) 采用 SIMPLE 压力速度耦合求解器,各离散格式均采用二阶迎风格式,离散相松弛因子设为 0.9,其余松弛因子均按默认设置;

(6) 在 DPM 模型中,结合本文喷嘴模型的特点选择压力旋流雾化模型 (pressure-swirl-atomizer), Number of Streams 参考相关的仿真经验设为 100,喷嘴出口直径设为 2.94 mm 。同时,打开随机碰撞模型 (stochastic collision)、破碎模型 (breakup) 中的 TAB 模型、聚合模型 (coalescence) 以及随机轨道追踪模型中的 Discrete Random Walk Model。同时,为了更加精准地模拟外流场的雾化过程,还要打开动态曳力模型 (dynamic-drag)。

2.4 空气辅助数值计算

在燃油喷嘴中加入气体雾化介质,可以极大地加剧气液两相间的相互作用,使得高速运动的气体介质与燃油液体间的动能交换增强,从而更好地使液膜破碎为细小的液滴。本节对离心式燃油喷嘴在辅助空气作用下的雾化性能进行了研究,并分析其在 13 个压力点工况下的雾化液滴分布,以及 SMD、不均匀度等性能参数的结果。

在燃油喷嘴模型中有空气流道,空气受到不同

压力的影响经过喷嘴模型中旋流式的流道,在外场中形成空气流场,进而影响燃油雾化。在辅助空气作用下的喷嘴雾化仿真方案同样是先计算连续相的稳态流场,待流场稳定收敛后,再加入离散相燃油液滴进行相间耦合的瞬态模拟计算。但与无辅助空气作用下的燃油喷嘴雾化过程相比,通入辅助空气后的外流场中会有强旋流的气体与燃油液体共同作用导致其雾化过程的发生,因而加强了燃油喷嘴的雾化性能。所以对辅助空气作用下外流场的连续相进行数值模拟计算。图 4 是在辅助空气作用下外流场的连续相结果。可以看到,辅助空气在外流场中呈螺旋状运动,这会极大地增强气液两相间的相互作用,有利于液膜的破碎。

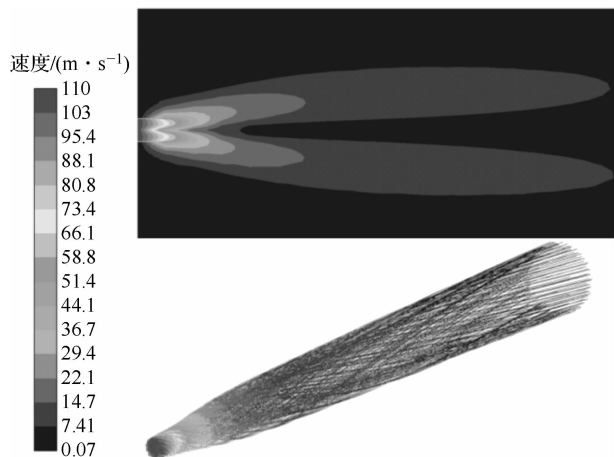


图 4 速度云图及速度空间流线图

在计算完外流场的连续相后,就可以加入离散相燃油液滴进行相间耦合的瞬态模拟计算。由于辅助空气作用下的离散相模型设置与无辅助空气时基本一致,因此可参照无空气辅助的内容进行设置。但不同的是,在辅助空气作用下的外流场射流速度较大,而 TAB 模型只适用于射流速度较低的情况,所以此时应该选择破碎模型(breakup)中的 WAVE 模型。WAVE 模型适用于韦伯数较高的情况,尤其适用于模拟高速射流下的雾化过程^[15]。因此,采用 WAVE 模型可以更好地对辅助空气作用下的外流场雾化过程进行数值模拟计算。

3 结果分析

对燃油喷嘴的雾化液滴分布,以及 SMD、不均匀度等性能参数进行数值模拟研究分析。

(1) 无空气雾化液滴分布

燃油喷嘴在无辅助空气作用下的雾化液滴分布

如图 5 所示。

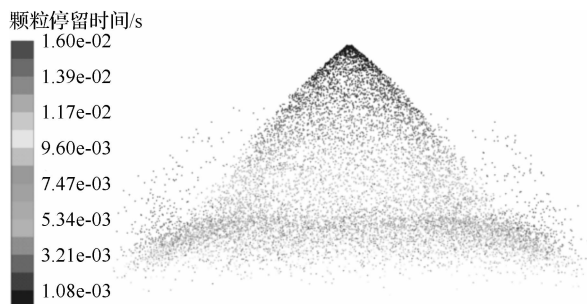


图 5 进口压力 1.0 MPa 无辅助空气的液滴分布

由图 5 可知,燃油喷嘴在无辅助空气作用下的雾化液滴分布都呈圆锥状分布。同时当工况压力增大时,液滴的轴向速度会逐渐增大,并导致液滴的喷射距离增加,且燃油速度带动周围的空气,进而影响液滴的运动轨道,导致雾化半角变小。而且随着工况压力的增大,飘散于雾化锥角周围的离散液滴也会越来越多。这是因为一方面喷射压力越大,液滴的速度也越大,因此加剧了液滴之间的碰撞,从而使部分液滴随机分散于空间分布当中;另一方面,如图 6 所示,在外流场中,高速燃油会由于巨大的径向压力差带动周围的空气运动,形成反向回流的湍流结构,导致喷嘴出口在两侧形成左右对称的回流区,该回流区会对雾化液滴的分布状态造成极大的影响(以 2.5 MPa 时的外流场为例)。

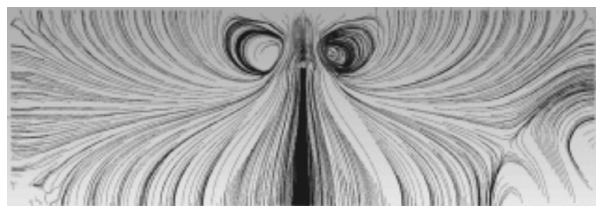


图 6 外流场喷射的回流区(2.5 MPa)

其次,图 5 表示的是燃油喷嘴的雾化液滴在计算区域范围内的平均停留时间大小。平均停留时间越长,说明液滴在该计算区域滞留的时间越长,同时由于空气阻力作用,停留时间越长,液滴速度越小。因此可以看出,在喷嘴出口附近的液滴速度最快,而距离喷嘴出口越远的液滴速度越小。这是因为燃油经旋流室作用后呈高速螺旋状运动,并从喷嘴出口处喷出,此时气液两相间的相对速度最大,剪切作用最为强烈,而雾化液滴由于在喷射过程中会发生能量损失,会导致其轴向速度沿着径向方向慢慢减小,所以距离喷嘴出口越远的地方液滴速度越小。

(2) 空气雾化液滴分布

离心式燃油喷嘴在辅助空气作用下的雾化液滴

分布如图 7、图 8、图 9 所示,图中的燃油喷嘴进口压力为 2.5 MPa。

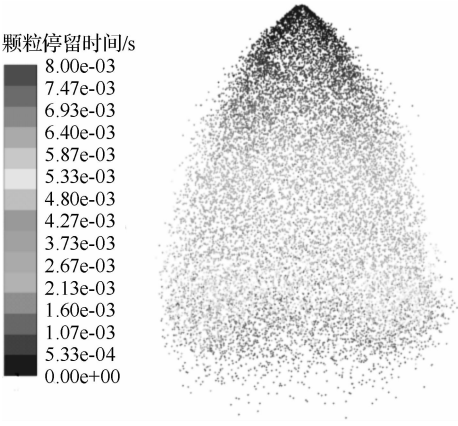


图 7 辅助空气 10 kPa 的液滴分布

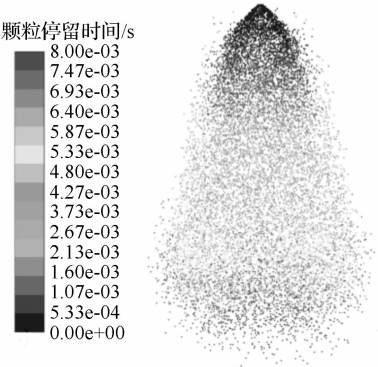


图 8 辅助空气 14 kPa 的液滴分布

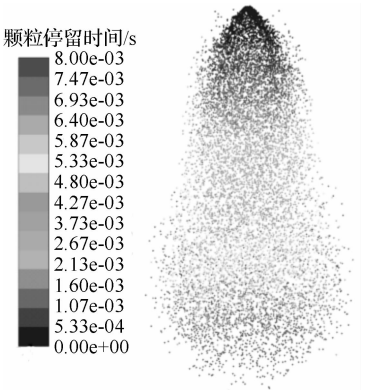


图 9 辅助空气 20 kPa 的液滴分布

由图 7、图 8、图 9 可知,燃油喷嘴在辅助空气作用下的雾化液滴分布都呈圆锥状分布。且随着燃油工况压力的增加,液滴分布范围先变大后变小,这是因为燃油工况压力的增加,其质量流量也增加;在低工况下,质量流量的增加对液滴分布状态占主导,所以液滴分布范围增加;在高工况下,上游压力占主导,所以上游压力约束了液滴分布。同时随着辅助空气进口压力的增大,其液滴分布范围减小,这主要

是因为空气进口压力增大,空气流分布范围变窄,进而约束液滴分布范围。

(3) 索太尔平均直径(SMD)

索太尔平均直径是反应喷嘴雾化效果的核心指标,通常使用 D_{32} 来表征雾化粒径的大小,其计算公式如下^[16] :

$$D_{32} = \frac{\sum D_i^3 \Delta n_i}{\sum D_i^2 \Delta n_i}$$

(6)

式中: D_{32} 是指索太尔平均直径, D_i 是指第 i 个粒子的直径, n_i 是指粒径为 D_i 的粒子数目。

这里主要对燃油喷嘴的整体 SMD 以及距离喷嘴出口 70 mm 处的 SMD 进行研究分析。使用 FLUENT 软件统计燃油喷嘴在压力点工况下的整体 SMD,再进一步通过公式 1 计算出 70 mm 处的 SMD,最后将仿真结果汇总,如表 3 所示。

表 3 燃油喷嘴外流场的 SMD

工况/ kPa	无空气辅助		10 kPa		14 kPa		20 kPa	
	70 mm/ 整体/		70 mm/ 整体/		70 mm/ 整体/		70 mm/ 整体/	
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
0.05	436.71	414.54	25.01	25.98	19.01	20.34	14.23	15.67
0.1	307.25	269.11	27.48	30.92	22.28	24.51	16.98	19.09
0.3	204.62	196.43	36.14	35.86	29.39	30.04	22.97	24.55
0.5	122.3	117.09	35.57	35.93	30.86	30.66	24.55	25.75
1.0	59.79	61.84	38.28	35.53	32.06	28.79	25.93	24.38
1.5	51.30	55.32	38.13	32.98	31.33	27.22	25.38	23.90
2.0	45.36	49.75	36.77	32.01	30.72	27.30	25.12	24.23
2.5	41.92	46.76	35.34	31.16	30.10	27.59	25.06	24.81
3.0	40.27	45.06	35.59	31.06	30.69	27.86	25.62	25.37
4.0	37.57	43.13	33.16	31.38	29.45	28.56	27.00	27.83
5.0	35.03	41.46	31.56	31.72	28.79	29.45	25.06	26.95
6.0	34.36	41.47	30.22	31.81	27.83	29.86	25.98	28.62
7.0	32.47	40.00	29.92	32.06	28.31	30.72	25.96	28.91

将表 3 的结果绘制成图 10、图 11 和图 12,并结合图表进行分析。可以发现,在无辅助空气作用下,整体 SMD 和 70 mm 处的 SMD 基本相似。而且 SMD 会随着工况压力的增大而变小,并逐渐趋于稳定。这是因为随着压力增大,气液两相之间的相互作用也越剧烈,因此更容易使液膜破碎成细小的液滴,但当液滴直径小到一定值时,由于液滴的表面张力变大,液滴直径难以变小。通过分析可知,在大于 1.5 MPa 后,最终离心式燃油喷嘴的整体 SMD 将稳定在 42 μm 左右。

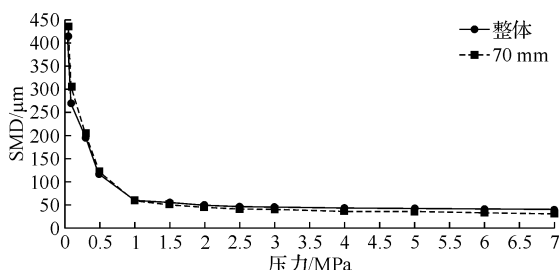


图 10 在无辅助空气作用下的整体 SMD 和 70 mm 处的 SMD

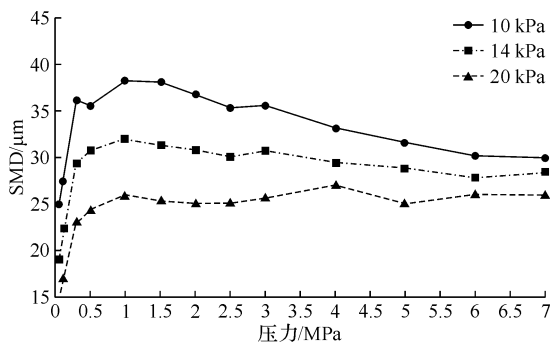


图 11 在辅助空气作用下 70 mm 处的 SMD

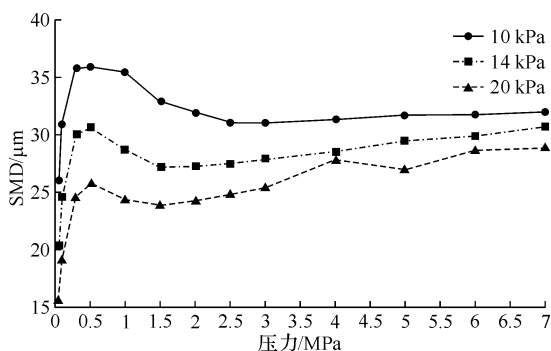


图 12 在辅助空气作用下的整体 SMD

统计燃油喷嘴在辅助空气作用下的整体 SMD 以及 70 mm 处 SMD, 结合表 3、图 10、图 11 和图 12 的结果进行对比, 可以看出, 在辅助空气的作用下, 燃油喷嘴的 SMD 都急剧变小, 尤其在低压力点工况下更为明显。在辅助空气的作用下, 此时燃油喷嘴的雾化过程不仅仅取决于燃油工况压力, 还取决于雾化介质的气动力影响, 是两者间相互作用的结果。因此在辅助空气的影响下, 空气流的剪切作用极大地加剧了液膜的破碎过程, 从而使得 SMD 变小。因此, 燃油喷嘴在辅助空气作用下的雾化性能会明显提升。

(4) 不均匀度

对距离喷嘴出口 70 mm 处各压力点工况下的不均匀度进行研究分析, 结果如图 13 所示。

结合图 13 可知, 在无空气辅助时, 燃油喷嘴在

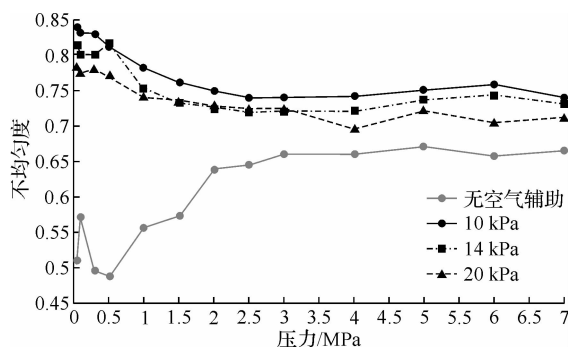


图 13 不均匀度对比

各压力点工况下的不均匀度值均在 48% 以上。在低压工况 (0.05 MPa、0.1 MPa、0.3 MPa) 时, 此时由于压力较小, 雾化状态还不太稳定, 因此导致其不均匀度较大; 而在工况大于 0.3 MPa 时, 不均匀度大会随着工况压力的增大而增大, 其最大值为 67.09%。这说明工况压力越大, 其外流场的雾化液滴分布越为紊乱。相比于无辅助空气作用时, 燃油喷嘴在辅助空气作用下的不均匀度更大, 且空气进口压力越大, 不均匀度越小。同时, 在辅助空气作用下的不均匀度会随着工况压力的增大而逐渐减小, 这与无辅助空气作用下的趋势相反。

4 结论

本文对离心式喷嘴在无空气辅助情况下雾化仿真和有空气情况下雾化仿真进行研究, 分析其在相关压力点工况下的流场分布状况以及性能参数的结果。本章主要的研究内容及结果有:

(1) 离心式燃油喷嘴在无辅助空气下的数值模拟研究表明, 在无辅助空气作用下, 燃油喷嘴的雾化液滴分布都呈圆锥状分布。同时, 随着燃油进口压力的增大, 整体索太尔平均直径 (SMD) 先下降, 最后稳定在 42 μm ; 不均匀度先上升, 最后稳定在 0.66。

(2) 离心式燃油喷嘴在辅助空气下的数值模拟为燃油喷嘴在不同辅助空气作用下 (10 kPa、14 kPa、20 kPa) 的雾化液滴分布以及性能参数进行了数值模拟研究。研究表明, 在不同辅助空气作用下的雾化液滴分布基本相似, 都呈圆锥状分布。但在辅助空气进口压力较小时, 其雾化液滴分布更广。同时, 燃油喷嘴的整体 SMD 以及不均匀度均随着辅助空气进口压力的增大而减小; 且随着燃油进口压力的增大, 整体索太尔平均直径 (SMD) 先上升, 后下降, 最后分别稳定在 32 μm 、30 μm 、28 μm ; 不均

匀度先下降,最后分别稳定在 0.74、0.73、0.71,且其 70 mm 处 SMD 在不同辅助空气进口压力下的最终结果将分别稳定在 30 μm 、28 μm 、25 μm 左右。

参考文献:

- [1] 新华,林宇震,张驰,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.
- [2] 王成军,陈海耿,马金凤.基于VOF方法数值模拟离心式喷嘴内两相流流动[J].东北大学学报(自然科学版),2009,30(7):1005-1008.
- [3] 岳明,徐行,杨茂林.离心式喷嘴内气液两相流动的数值模拟[J].工程热物理学报,2003(5):888-890.
- [4] KIM S, HWANG J W, LEE C S. Experiments and modeling on droplet motion and atomization of diesel and bio-diesel fuels in a cross-flowed air stream[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2010, 31(4):667-679.
- [5] YU Y S, LI G X, WANG Y, et al. Modeling the atomization of high-pressure fuel spray by using a new breakup model[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016,40(1):268-283.
- [6] JUN I, HIDEHIRO H, TADASHI T, et al. Integrated simulation of the atomization process of a liquid jet through a cylindrical nozzle[J]. Interdisciplinary Information Sciences, 2007, 13(1):7-16.
- [7] SHIM Y S, CHOI G M, KIM D J. Numerical and experimental study on hollow-cone fuel spray of highpressure swirl injector under

high ambient pressure condition[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2008, 22(2):320-329.

- [8] BROUKAL J, HAJEK J. Validation of an effervescent spray model with secondary atomization and its application to modeling of a large-scale furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(13):2153-2164.
- [9] 徐开华.新型双流喷嘴的雾化实验研究与数值模拟[D].广州:华南理工大学,2013.
- [10] 高岩飞.点燃式煤油发动机燃油雾化技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.
- [11] HOU Y, TAO Y, HUAI X, et al. Numerical characterization of multi-nozzle spray cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 39:163-170.
- [12] 周奎.旋流式喷嘴横向流中雾化场实验及数值分析[D].上海:上海交通大学,2010.
- [13] 张光通.旋流喷嘴雾化特性的仿真与实验研究[D].秦皇岛:燕山大学,2016.
- [14] 林小星.几种喷嘴的喷射流场模拟研究[D].沈阳:东北大学,2014.
- [15] 刘宁.柴油机空气辅助燃油喷射系统研究[D].济南:山东大学,2018.
- [16] 邵毅明,黄震.溶气燃油喷射雾化机理与燃烧仿真研究[M].成都:西南交通大学出版社,2007.

Simulation of Centrifugal Spray Nozzle for Gas Turbine

Wang Honglian¹, Zhao Dingyi¹, Shao Fangqin², Zheng Gaofeng²

(1. China National South Aviation Industry Co., Ltd., Hunan Zhuzhou 412002, China;

2. Department of Instrumental and Electrical Engineering, Xiamen University, Fujian Xiamen 361102, China)

Abstract: In this work, Solidworks, ANSYS ICEM CFD were used to model and mesh the external field of the centrifugal nozzle, the transient external flow fields of the centrifugal nozzle under different pressures were numerically simulated by using FLUENT. To study the effect of auxiliary air on the flow fields, the distribution of the spray droplet and performance parameters under 13 pressure conditions (0.05 MPa, 0.1 MPa, 0.3 MPa, 0.5 MPa, 1.0 MPa, 1.5 MPa, 2.0 MPa, 2.5 MPa, 3.0 MPa, 4.0 MPa, 5.0 MPa, 6.0 MPa, 7.0 MPa) were studied. It is found that the spray droplets showed a conic distribution under the non-air auxiliary condition where the Sauter mean diameter (SMD) and the maximum (minum) value of non-uniformity were 414.54 μm (40 μm)、0.670 9 (0.487 4) respectively. With the effect of air auxiliary, the spray droplets exhibited cone like distribution where the Sauter mean diameter (SMD) and the maximum (minum) value of non-uniformity were 35.93 μm (15.67 μm)、0.838 7 (0.704 0) respectively. This work provides a reference for the application of centrifugal fuel nozzle for gas turbine.

Key words: centrifugal nozzle; spray simulation; air auxiliary; SMD; non-uniformity