

小桐子油及其生物柴油在旋流喷嘴中 雾化特性数值模拟

王碧灿¹, 李法社¹, 张逸水^{1,2}, 王霜^{1,2}, 陈煜^{1,2}

(1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093; 2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093)

摘要:为了掌握入射压力对生物质燃油在旋流喷嘴中雾化特性的影响规律,在不同入射压力条件下,采用 Fluent 数值模拟的方法对小桐子油和小桐子生物柴油进行雾化过程模拟仿真研究。结果表明:使用的旋流雾化喷嘴比普通喷嘴对索特平均直径(D_{32})有更好的优化效果,内螺旋结构增强了雾化的湍流强度,使得气液两相混合及对雾化液滴的破碎效果更好;在等温条件下,不同入射压力对 D_{32} 、雾化总表面积、雾化速度、雾化贯穿距影响较大。入射压力越大, D_{32} 越小;入射压力越大,雾化总表面积、雾化速度、雾化贯穿距越大。入射压力对 D_{32} 的影响存在临界值,即小桐子油雾化入射压力达到 0.8 MPa、小桐子生物柴油雾化入射压力达到 0.7 MPa 后, D_{32} 趋于稳定,不会随入射压力的增大继续减小;通过曲线拟合及雾滴粒径数量密度分析,得到了不同入射压力距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化的拟合方程及雾化液滴不同粒径数量密度分布情况。

关键词:小桐子油;生物柴油;旋流喷嘴;雾化入射压力;数值模拟;雾化特性

中图分类号:TS225.1;TQ51 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)10-0077-07

Numerical simulation of atomization characteristics of *Jatropha curcas* oil and *Jatropha* biodiesel in a swirl nozzle

WANG Bican¹, LI Fashe¹, ZHANG Yishui^{1,2}, WANG Shuang^{1,2}, CHEN Yu^{1,2}

(1. School of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China)

Abstract: In order to understand the influence of incident pressure on the atomization characteristics of biomass fuel in a swirl nozzle, Fluent numerical simulation method was used to simulate the atomization process of *Jatropha curcas* oil and *Jatropha* biodiesel under different incident pressures. The results showed that compared with the ordinary nozzle, the swirl atomization nozzle used had better optimization effect on the average Sauter diameter (D_{32}), and the internal spiral structure enhanced the turbulent intensity of atomization, making the gas-liquid two-phase mixing and the effect of breaking the droplets better. Under isothermal conditions, different incident pressures had greater influences on D_{32} , total surface area of atomization, atomization speed and atomization penetration distance. The greater the incident pressure, the

smaller the D_{32} ; the greater the incident pressure, the greater the total surface area of atomization, atomization speed and atomization penetration distance. There was a critical value for the influence of the incident pressure on D_{32} . After the atomization incident pressure of *Jatropha curcas* oil and *Jatropha* biodiesel respectively reached 0.8 MPa and 0.7 MPa, D_{32} tended to be stable and would not continue to decrease with the increase of

收稿日期:2020-01-17;修回日期:2020-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51766007);云南省自然科学基金项目(2018FB092);云南省自然科学基金项目(2015FB128);NSFC 云南联合基金项目(U1602272);省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室自设项目(CNMRCUTS1704)

作者简介:王碧灿(1993),男,硕士研究生,研究方向为能源动力(E-mail)775174666@qq.com。

通信作者:李法社,教授,博士(E-mail)asan97@qq.com。

incident pressure. Through curve fitting and analysis of droplet particle size number density, the fitting equation of the axial D_{32} change at different incident pressure away from different positions of the nozzle and the number density distribution of different particle sizes of atomized droplets were obtained.

Key words: *Jatropha curcas* oil; biodiesel; swirl nozzle; atomization incident pressure; numerical simulation; atomization characteristics

液体燃料在应用过程中,为了提高燃烧效率、减少有害物排放等,普遍会进行雾化破碎^[1]。与普通柴油相比,生物质燃油较高的运动黏度、密度、表面张力等使其在相同条件下雾化困难、雾化质量较差,导致其燃烧过程中会出现积炭、火焰稳定性差等问题^[2],所以改善生物质燃油雾化质量对其扩大应用和商业发展具有重要意义。

对于雾化研究,国内外学者研究方向存在差异^[3]。Jakobs 等^[4]分析了高黏度生物质燃油在双流体喷嘴中雾化质量随气体速度和反应器压力的变化规律,将研制的雾化喷嘴用于常压气流床汽化炉,探究了雾化质量对汽化过程的影响。Lujaji 等^[5]为了探索生物质燃油在工业炉窑中的应用,采用无燃烧空气辅助雾化喷嘴,研究了生物质燃油与乙醇混合后的燃料雾化特性。Pandey 等^[6]分析了影响高黏度生物质燃油喷雾特性的物性参数之间的相关性,喷射参数对喷雾锥角、破碎长度和燃油贯穿距的影响,并对雾化特性进行了分析及总结。龙潭^[7]采用高速摄影仪和 MATLAB 软件对高黏度生物油雾化特性进行了试验研究。结果发现,随着喷射距离的增加,生物油液滴的索特平均直径(D_{32})呈现先增大后减小再缓慢增加的变化趋势,而液滴数目呈现先减少后增加的变化趋势。田仲富等^[8]采用马尔文激光粒度分析仪研究了生物质燃油的雾化特性,并分析了气液质量流量比,沿喷孔轴向距离、径向距离,液体的表面张力系数以及液体的黏性系数等参数对生物质燃油雾化特性的影响。

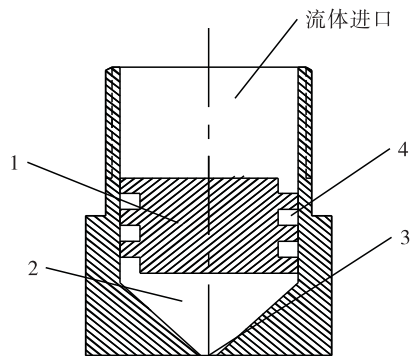
以上学者研究了不同实际情况或不同工况下流体雾化特性,而对于生物质燃油在高压旋流雾化喷嘴中的雾化特性数值模拟研究较少。因此,本文针对小桐子油及其生物柴油在旋流雾化喷嘴中的雾化特性,通过 Fluent 软件进行喷嘴外部流场的数值模拟,对不同入射压力条件下 D_{32} 、雾化总表面积、雾化速度、雾化贯穿距等雾化参数进行探究。

1 模型建立

1.1 物理模型

本文采用的喷嘴属于压力旋流雾化喷嘴,喷嘴

由喷嘴主体及旋流芯组成,喷嘴螺杆长 12 mm,螺柱半径 4.75 mm,其剖面图如图 1 所示。



注:1. 旋流芯;2. 旋流室;3. 喷孔;4. 螺旋槽道。

图 1 旋流喷嘴剖面图

生物质液体燃料通过输油管路进入喷嘴内腔,先沿喷嘴进口流入,到达旋流芯后分流进入旋流芯的旋流通道中,后沿切线方向流入旋流室内进行旋流,生物质液体燃料在喷嘴锥形的旋流室中高速旋转,最后通过喷孔离开喷嘴形成雾化流场。

1.2 物理模型的假设

为了方便分析,需要对实际物理现象进行如下假设:

(1) 在旋流芯进液入口和旋流室中没有流体的脱壁现象,进口流量系数等于 1;

(2) 由于喷嘴尺寸较小,其入口和出口间的势能差很小,流体的位势能的变化可以忽略不计;

(3) 流场的边界为绝热边界条件,不与外界发生热量交换;

(4) 雾化介质为常温下的小桐子油和小桐子生物柴油,因在流动过程中密度几乎不随入射压力发生变化,可以忽略压缩性的影响,将其看成不可压缩的流体。

1.3 外部流场数学模型选择

1.3.1 边界条件与计算工况

喷嘴入口与出口均设置为压力型,其中入口入射压力在 0.1~1.1 MPa 之间,出口背压为 1 个标准大气压,温度为 25℃。本文选用小桐子油和小桐子生物柴油为研究对象,其物性参数如表 1 所示。固体壁面为无滑移、无质量渗透及绝热的固体边界。为了确

保仿真计算中的精度,避免固体边界附近网格划分过细,采用标准壁面函数考虑壁面对流体的影响。

表1 小桐子油和小桐子生物柴油3种物性参数对比

样品	运动黏度/ (mm ² /s)	密度/ (g/cm ³)	表面张力/ (mN/m)
小桐子油	11.579	0.909	37.3
小桐子生物柴油	5.764	0.874	30.1

1.3.2 外部流场数学模型

采用DPM模型对雾化室内的雾化颗粒进行追踪。雾化使用破碎模型为TAB模型。湍流模型采用RNGk- ϵ 模型,该模型的计算优势为:

(1)在计算速度梯度较大的流场时精度更高;

(2)该模型考虑了旋转效应,对强旋转流动计算精度更高;

(3)该模型包括计算湍流Prandtl数(普朗特数,Pr)的解析公式,而不像标准k- ϵ 模型仅可以使用用户定义的常数。

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (1)$$

式中: μ 为黏度; C_p 为等压比热容; k 为热导率; α 为热扩散系数; v 为运动黏度。

将空气看成连续相,生物质液体燃料液滴为离散相,将连续相计算收敛后加入离散相进行计算。

1.3.3 网格划分^[9]

对于螺旋喷嘴外部流场网格划分采用六面体网格,对流场入口附近及流场中心的网格进行加密,在其他条件相同的情况下,对不同疏密的网格进行计算发现:当模型网格总单元数为47万~56万时,计算结果D32随单元数的不同有着明显变化;当模型网格总单元数为57万~65万时,计算结果D32基本不随单元数的增加而变化。最终取网格数量为575340个,如图2所示。

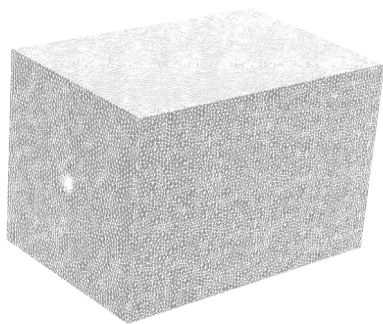


图2 外部流场网格划分

2 模拟结果及分析

2.1 D32

图3为喷嘴雾化液滴D32随入射压力变化规

律。如图3所示,随着入射压力升高,D32逐渐减小,但这种减小是有限度的,当入射压力达到一定值后,D32变化已不明显,即在等温条件下,入射压力有其临界值,达到一定压力后,增大入射压力不会对D32有进一步减小的作用。从液滴雾化能量平衡关系的角度分析,入射压力达到临界值之前,喷嘴出口的动能主要用于克服表面张力和黏滞力做功,且入射压力越大,其克服表面张力和黏滞力所做的功越多,D32越小^[10]。由于D32的减小,增大了雾滴和空气的接触表面积,有利于热质交换过程的进行。当喷嘴入射压力达到临界值后,D32变化不明显,即克服表面张力和黏滞力所做的功基本不变,其余能量转化为液雾的动能,且随着喷嘴入射压力的增大,雾滴的速度逐渐增加,从而缩短了雾滴与空气的接触时间,将不利于热质交换过程的进行^[11-12]。分析对比小桐子生物柴油旋流喷嘴D32模拟值与小桐子油旋流喷嘴D32模拟值可知,相同喷嘴及工况条件下,运动黏度、密度、表面张力越小,其D32越小。

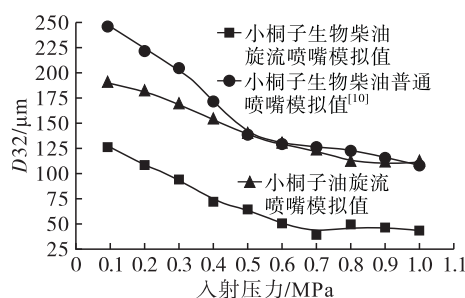


图3 喷嘴雾化液滴D32随入射压力变化规律

由图3可知,采用旋流喷嘴比普通喷嘴的雾化效果更好,普通喷嘴的雾化液滴D32范围为110~250 μm ,本模拟采用的旋流喷嘴的雾化液滴D32范围为40~130 μm ,雾化液滴D32优化较好的原因如图4所示。由图4中单个图可知,当气液两相流刚刚喷出喷嘴极短的时间内,由于气相和液相剧烈的混合作用,D32波动较大,因为该模拟使用的是内螺纹结构的喷嘴,在螺纹结构内由于螺纹结构对流体施加的剪切应力作用,增加了流体的切向速度,减弱了流体的轴向速度,同时由于流体的惯性较大,会在螺纹结构内停留较长时间,使得流体速度有充分时间发展,由此说明内螺纹结构的喷嘴在气液两相喷出喷嘴的极短时间内混合程度非常剧烈,湍流程度增强,混合效果较好;由图4中8幅图综合分析可知,随着雾化入射压力的升高,其D32波动更为剧烈,说明雾化入射压力的升高,有助于气液两相的混合,体现在气相对液相的破碎作用及液滴之间高速碰撞的破碎作用相互叠加效应,即对液滴的雾化破碎优化效果更好,D32更小。

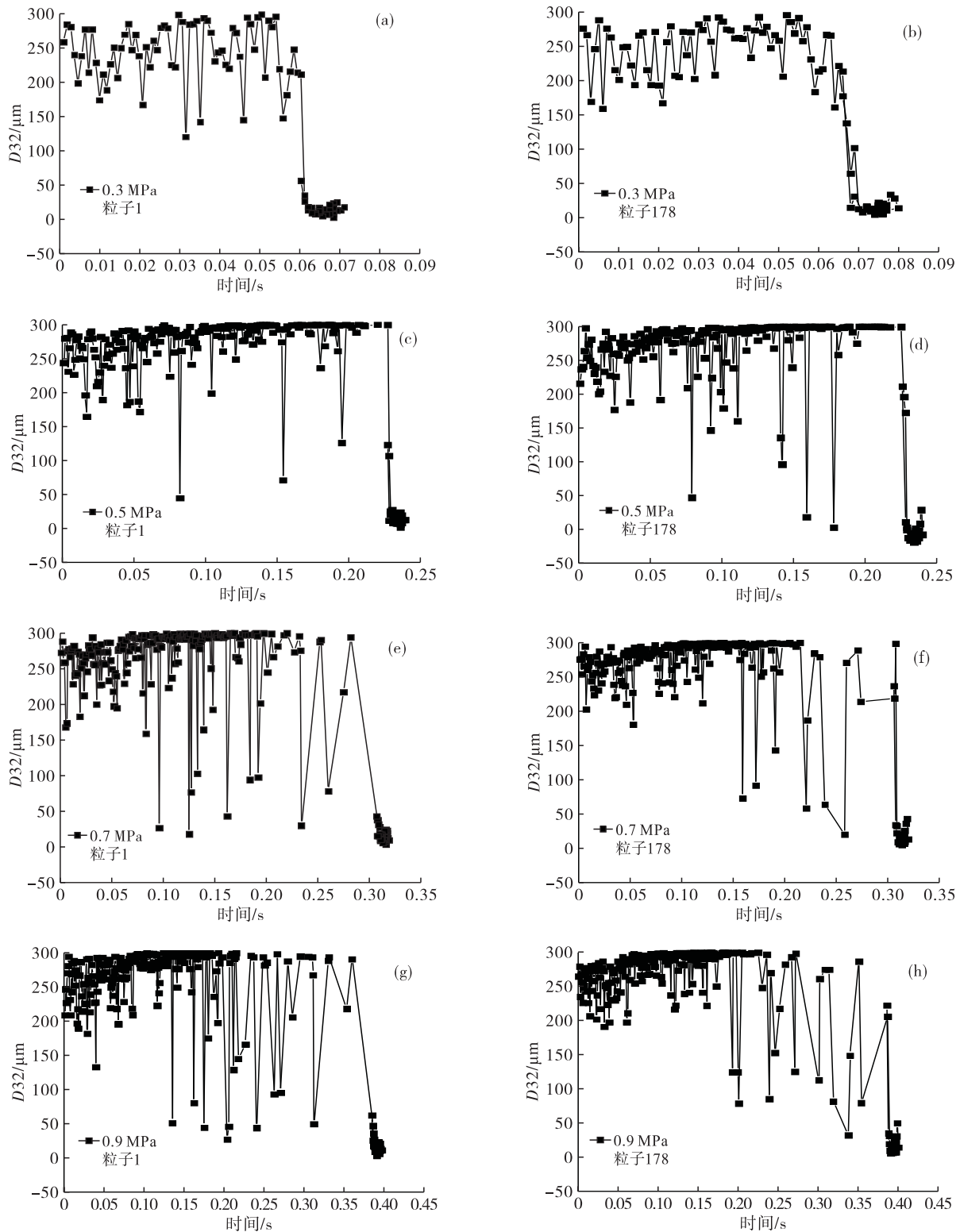


图4 小桐子生物柴油随追踪时间的延长旋流喷嘴雾化液滴 D_{32} 的变化规律

2.2 雾化总表面积

图5为喷嘴入射压力与雾化总表面积的关系。由图5可知,雾化总表面积随喷嘴入射压力的升高而增大,当入射压力达到一定值后,雾化总表面积趋于平稳。这是因为随着雾化入射压力的升高,雾化液滴破碎成相似粒径的更多小液滴,导致雾化总表面积随入射压力的升高继续增大,当入射压力达到

临界值时,雾化液滴 D_{32} 变化趋势趋于平稳,因而雾化总表面积趋于平稳。雾化总表面积的增大有利于液滴的热质交换^[13]。从小桐子油雾化总表面积模拟值与小桐子生物柴油雾化总表面积模拟值的对比可知,因为小桐子油的运动黏度、密度、表面张力都大于小桐子生物柴油,相同条件下更难雾化,雾化液滴的破碎效果不理想,导致其雾化液滴 D_{32} 更

大,总表面积更小。

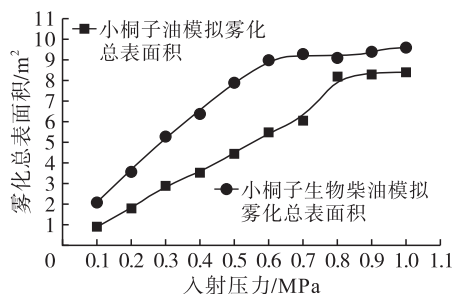


图5 喷嘴入射压力与雾化总表面积的关系

2.3 轴向 D_{32}

图6、图7分别为不同入射压力下距离喷嘴不同位置处小桐子油和小桐子生物柴油轴向 D_{32} 变化规律。

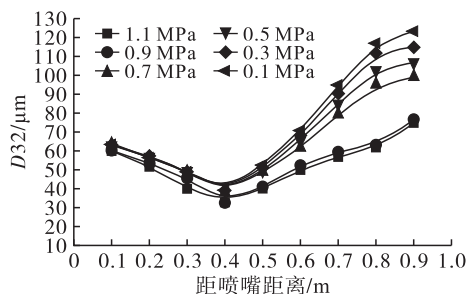


图6 小桐子油不同入射压力下距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化规律

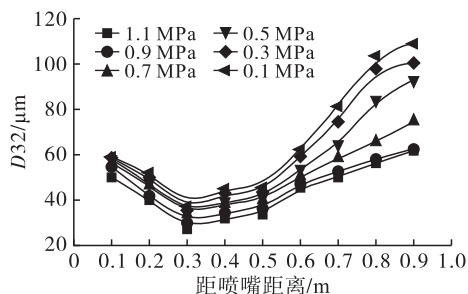


图7 小桐子生物柴油不同入射压力下距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化规律

由图6和图7可知,雾化液滴从喷口射出后,其 D_{32} 呈现先减小后增大的趋势。小粒径主要分布在中部。这是由于液滴在喷出后,由于初始动量大,在环境中与静止的空气以及不同的液滴之间发生碰撞,在克服了液滴的表面张力之后,液滴发生二次破碎,从而在流场中部达到其 D_{32} 的最小值。随着雾化的继续发展,部分没有破碎且具有较大动量的大颗粒液滴继续向后运动,同时,在空气阻力作用下,由于液滴的动量逐渐减小,且不同液滴相互碰撞后无法克服液滴的表面张力,从而合成较大的液滴,致使雾化液滴 D_{32} 增大,此时,雾场尾部为稀疏的大颗粒液滴。随着雾化入射压力的升高,雾化液滴 D_{32} 不断减小。对小桐子油与小桐子生物柴油不同

入射压力下距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化规律进行比较可知,因为小桐子油的运动黏度、密度、表面张力都较大,所以在不同入射压力距离喷嘴不同位置处小桐子油的轴向 D_{32} 更大。

图8为0.1 MPa下小桐子油距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化多项式拟合曲线。表2为小桐子油不同入射压力下距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化多项式拟合方程。

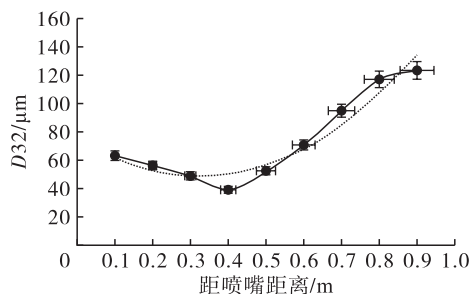


图8 0.1 MPa下小桐子油距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化多项式拟合曲线

表2 0.1~1.1 MPa下小桐子油距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化多项式拟合方程

入射压力/ MPa	多项式拟合方程	相关系数(R^2)
0.1	$y = 256.99x^2 - 166.16x + 75.810$	0.936 6
0.3	$y = 239.94x^2 - 159.67x + 75.521$	0.921 4
0.5	$y = 220.16x^2 - 151.55x + 74.688$	0.915 7
0.7	$y = 207.84x^2 - 151.57x + 75.681$	0.909 8
0.9	$y = 167.14x^2 - 143.21x + 72.643$	0.877 4
1.1	$y = 168.76x^2 - 145.21x + 71.686$	0.902 1

图9为0.1 MPa下小桐子生物柴油距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化多项式拟合曲线。表3为小桐子生物柴油不同入射压力下距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化多项式拟合方程。

由图8、图9、表2、表3可知,小桐子油和小桐子生物柴油不同入射压力下距喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 模拟数据的拟合结果符合一元二次多项式分布。

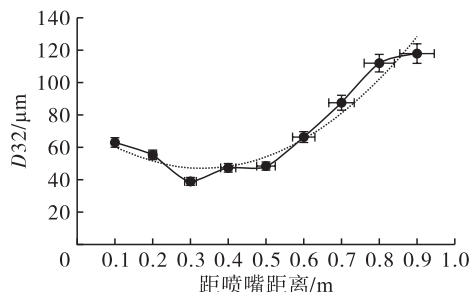


图9 0.1 MPa下小桐子生物柴油距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化多项式拟合曲线

表3 0.1~1.1 MPa 下小桐子生物柴油距离喷嘴
不同位置处轴向 D_{32} 变化多项式拟合方程

入射压力/ MPa	多项式拟合方程	相关系数(R^2)
0.1	$y = 250.57x^2 - 166.26x + 74.569$	0.943 7
0.3	$y = 237.62x^2 - 163.32x + 73.169$	0.931 1
0.5	$y = 231.59x^2 - 172.07x + 73.700$	0.959 1
0.7	$y = 167.90x^2 - 132.53x + 67.776$	0.913 2
0.9	$y = 142.38x^2 - 116.91x + 62.448$	0.809 4
1.1	$y = 142.97x^2 - 144.47x + 58.405$	0.842 1

2.4 雾化速度

图10、图11分别为小桐子油和小桐子生物柴油不同入射压力下距离喷嘴不同位置处雾化速度变化规律。

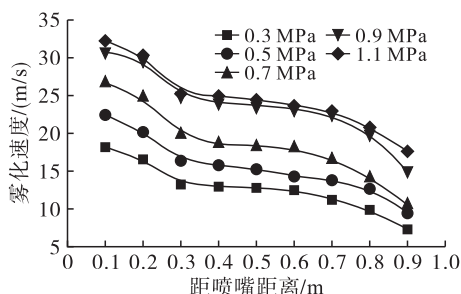


图10 小桐子油不同入射压力下距离喷嘴
不同位置处雾化速度变化规律

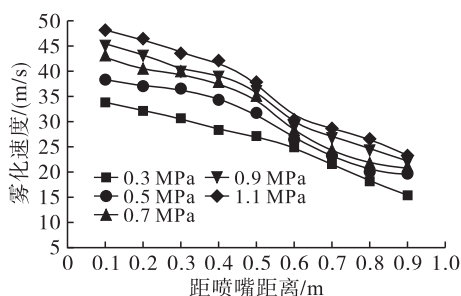


图11 小桐子生物柴油不同入射压力下距离喷嘴
不同位置处雾化速度变化规律

由图10、图11可知,雾化液滴的速度场呈现锥形分布,且在出口处,雾化速度最大,离出口越远,雾化速度越小,这是由于液滴在喷出后,与空气发生碰撞,发生动量交换,使得雾化速度逐渐降低,并且由于空气的卷吸作用,导致部分液滴回流,综合作用下,雾化速度呈现逐渐减小的趋势。不同入射压力下小桐子油和小桐子生物柴油距离喷嘴不同位置处雾化速度变化趋势基本相同,表明喷雾流场雾化速度几何形状的整体变化趋势相似性比较高。

2.5 雾化液滴不同粒径数量密度分布

通过“分组”和“统计频率”的方法对所得数据进行综合分析。“分组”就是确定直方图的横轴坐标起止范围和每个小组的起止位置。选一个比最小

值小的一个恰当的值作为第一个组的起始坐标,然后依次加上“分组组距”,直到最后一个数据值比“最大值”大为止。统计频率,“频率”就是去统计每个分组中所包含的数据的个数。最简单的方法就是直接在所有的数据中统计,但当数据量很大的时候,这种方法不但费时,而且容易出错。一般来说有两种方法来统计每个小组的数据个数:①采用“FREQUENCY”函数法;②采用“COUNT IF”然后再去相减。这里介绍的是“FREQUENCY”函数方法:“Date_array”是选取要统计的数据源,就是选择原始数据的范围;“Bins_array”是选取直方图分组的数据源,就是选择分组数据的范围。通过 Excel 进行数据处理后得雾化液滴不同粒径数量密度分布图,见图12、图13。

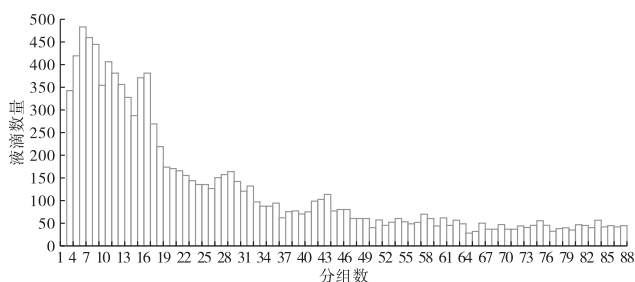


图12 0.8 MPa 小桐子油雾化液滴
不同粒径数量密度分布图

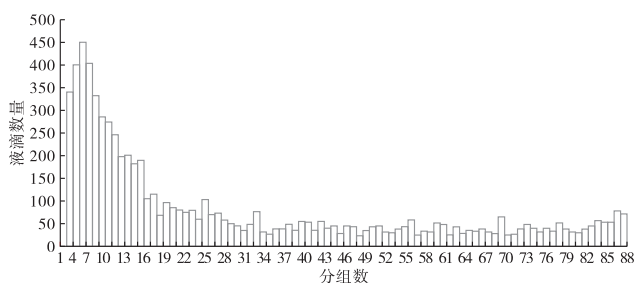


图13 0.7 MPa 小桐子生物柴油雾化液滴
不同粒径数量密度分布图

如图12所示,将从 Fluent 软件导出的小桐子油入射压力为 0.8 MPa 下的 D_{32} 数据导入 Excel 文档进行计算, D_{32} 大于 $300 \mu\text{m}$ 、 D_{32} 小于 $19 \mu\text{m}$ 各分一组(组距未达 $3.20 \mu\text{m}$),其余数据极差为 $281 \mu\text{m}$,分组 86 组,组距为 $3.20 \mu\text{m}$ 。

如图13所示,将从 Fluent 软件导出的小桐子生物柴油入射压力为 0.7 MPa 下的 D_{32} 数据导入 Excel 文档进行计算, D_{32} 大于 $300 \mu\text{m}$ 、 D_{32} 小于 $11 \mu\text{m}$ 各分一组(组距未达 $3.36 \mu\text{m}$),其余数据极差为 $289 \mu\text{m}$,分组 86 组,组距为 $3.36 \mu\text{m}$ 。

由图12和图13可知,小桐子油和小桐子生物柴油雾化液滴粒径数量以小粒径为主,密度分布集中在 $53.76 \mu\text{m}$ 和 $48.30 \mu\text{m}$ 之前,雾化效果较好。

2.6 雾化贯穿距

图14为小桐子油和小桐子生物柴油液滴雾化贯穿距随雾化入射压力变化规律。由图14可知,初始入射压力越大,雾化贯穿距越大,且符合线性分布,相关系数达到0.989 97(小桐子生物柴油)和0.996 04(小桐子油)。这是因为初始入射压力越大,初始动量越大,液滴克服表面张力及黏滞力更容易,即更容易破碎成小的雾化液滴,所以雾化贯穿距越大^[14]。

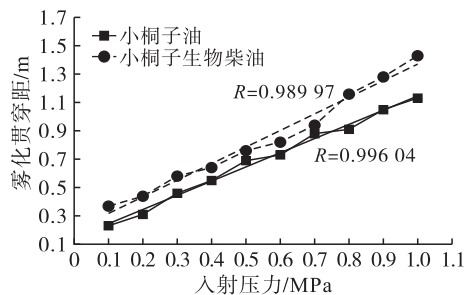


图14 小桐子油和小桐子生物柴油液滴雾化贯穿距随雾化入射压力变化规律

3 结论

通过Fluent软件对小桐子油和小桐子生物柴油的雾化过程进行数值模拟分析,得出以下主要结论:

(1)本研究使用的旋流雾化喷嘴比普通喷嘴对雾化液滴 D_{32} 有更好的优化效果,内螺旋结构增强了雾化的湍流强度,使得气液两相混合及对雾滴的破碎效果更好, D_{32} 更小。

(2)在等温条件下,不同入射压力对雾化液滴 D_{32} 、雾化总表面积、雾化速度、雾化贯穿距影响较大。入射压力越大,雾化液滴 D_{32} 越小;入射压力越大,雾化总表面积、雾化速度、雾化贯穿距越大。入射压力对于雾化液滴 D_{32} 的影响存在临界值,即小桐子油雾化入射压力达到0.8 MPa、小桐子生物柴油雾化入射压力达到0.7 MPa后,雾化液滴 D_{32} 趋于稳定,不会随入射压力的增大继续减小。

(3)通过曲线拟合及雾化液滴粒径数量密度分析,得到了不同入射压力下距离喷嘴不同位置处轴向 D_{32} 变化的拟合方程及雾化液滴不同粒径数量密度分布情况。

参考文献:

[1] SHEN Y C, LI F S, LIU Z W, et al. Study on the characteristics of evaporation - atomization - combustion of biodiesel[J]. J Energy Inst, 2019, 92(5): 1458 - 1467.

[2] SHAO C X, LUO K, CHAI M, et al. A computational framework for interface - resolved DNS of simultaneous atomization, evaporation and combustion[J]. J Comput Phys, 2018, 371(15): 751 - 778.

[3] INAMURA T, KATAGATA N, NISHIKAWA H, et al. Effects of prefilmer edge thickness on spray characteristics in prefilming airblast atomization[J/OL]. Int J Multiphas Flow, 2019, 121: 103117 [2020 - 01 - 10]. <http://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103117>.

[4] JAKOBS T, DJORDJEVIC N, FLECK S, et al. Gasification of high viscous slurry R&D on atomization and numerical simulation[J]. Appl Energ, 2012, 93: 449 - 456.

[5] LUJAJI F C, BOATENG A A, SCHAFFER M, et al. Spray atomization of bio - oil/ethanol blends with externally mixed nozzles[J]. Exp Therm Fluid Sci, 2016, 71: 146 - 153.

[6] PANDEY R K, REHMAN A, SARVIYA R M. Impact of alternative fuel properties on fuel spray behavior and atomization[J]. Renew Sust Energ Rev, 2012, 16(3): 1762 - 1778.

[7] 龙潭. 生物质热解气冷凝及生物油燃烧的试验研究与数值模拟[D]. 合肥:中国科学技术大学,2014.

[8] 田仲富,王述洋,曹有为. 基于马尔文激光粒度分析仪的生物质燃油雾化特性研究[J]. 安徽农业科学,2013,41(32): 12700 - 12702, 12721.

[9] 张逸水,王霜,李法社. 地沟油生物柴油在旋流喷嘴中的雾化实验及模拟[J]. 过程工程学报,2019,19(5): 940 - 948.

[10] PAINE M D, ALEXANDER M S, STARK J P W. Nozzle and liquid effects on the spray modes in nanoelectrospray[J]. J Colloid Interf Sci, 2007, 305(1): 111 - 123.

[11] LI X, YANG S, LI T Y, et al. Investigations on near - field atomization of flash boiling sprays for gasoline direct injection related applications[J/OL]. Fuel, 2019, 257: 116097 [2020 - 01 - 10]. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.16097>.

[12] LI W, PAN Y, YAO Y, et al. Modeling and parametric study of the ultrasonic atomization regeneration of desiccant solution[J]. Int J Heat Mass Tran, 2018, 127: 687 - 702.

[13] 张光通. 旋流喷嘴雾化特性的仿真与实验研究[D]. 河北 秦皇岛:燕山大学,2016.

[14] 石伏捷,刘荣华,王鹏飞,等. 压力旋流喷嘴雾化特性数值模拟[J]. 工业安全与环保,2019,45(6): 52 - 57, 92.