

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.01.013

双股射流碰撞雾化特征实验

王 辉, 曹 伟, 张 帅, 郭永军, 杨 琦, 吴少华

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院 燃烧工程研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 为改善双股射流碰撞雾化器的雾化性能, 基于自行搭建的射流碰撞雾化实验台, 采用 CCD 拍摄技术, 研究射流速度、碰撞角度、喷嘴出口内径和黏度对雾化特征的影响。结果表明: 随着射流韦伯数和碰撞角度的增大, 喷雾角增大, 液滴的索太尔平均直径(SMD)减小, 且液滴分布更加均匀; 喷嘴内径较小时形成的液膜厚度较薄, 稳定性差, 喷雾角较小, 在所研究的范围内, 液滴的平均直径不受喷嘴内径的影响; 液体黏度越大, 液膜越稳定不易破碎, 液膜尺寸越大, 喷雾角越小, 液滴的平均粒径越大; 在韦伯数较小时, 差异明显, 而在较高的韦伯数条件下, 差距较小。在进行 40% 浓度甘油溶液雾化实验时, 观察到了液膜翻转现象, 从碰撞点往下出现连续多个相互垂直的液膜。因此, 增大射流速度、碰撞角度, 减小液体黏度, 有助于改善雾化性能。

关键词: 射流碰撞; 韦伯数; 碰撞角; 黏度; 雾化特征

中图分类号: V434+.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)01-0093-08

Atomization characteristics experiment of impinging jets

WANG Hui, CAO Wei, ZHANG Shuai, GUO Yongjun, YANG Qi, WU Shaohua

(Combustion Engineering Research Institute, School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To improving the atomization characteristics of dual impinging jets, based on the impinging jets platform established by ourselves, the effects of jet velocity, impingement angle, nozzle diameter and liquid viscosity on the atomization characteristics were studied by CCD Photography technology. The experimental results indicate that with the increase of Weber number and impingement angle, the spray angle is increased, droplet SMD is decreased and the droplet distribution is more uniform. When the nozzle diameter is small, the thickness of liquid sheet is small, the liquid sheet is unstable and the spray angle is small. The nozzle diameter has little influence on SMD. Besides, the larger the liquid viscosity, the more unstable of the liquid, the larger the liquid size, the smaller the spray angle and the larger the droplet SMD. When the Weber number is small, the difference is obvious and when the Weber number is large, the difference is smaller. Also, in the study of 40% concentration of glycerol solution atomization characteristics, the phenomenon of liquid sheet flip was observed, and multiple consecutive perpendicular liquid sheets could appear down from the impact point. In conclusion, increasing the jet velocity and impinging angle and decreasing the liquid viscosity can improve the atomization characteristics.

Keywords: impinging jets; Weber number; impingement angle; viscosity; atomization characteristics

对于发动机而言, 雾化质量的优劣能够影响点火、燃烧效率、火焰稳定性等, 因此, 对雾化特征的理解和控制是发动机燃烧系统设计和优化的前提。射流碰撞雾化器由于结构简单, 易于制造和维修, 并且在不同喷注压力下都能具有良好的雾化和混合特点, 所以在液体火箭发动机上得到了广泛地应用。例如, 阿波罗登月计划所采用的 F-1 发动机, 其主燃烧室采用的就是射流碰撞雾化器^[1], 除此之外, 射流碰撞雾化器还应用在了 H-1、Titan、XLR-132 等型号的液体火箭发动机上^[2]。

自 Savart 在 1833 年观察到两股相同的同轴射

流碰撞产生的液膜破碎形成液滴之后, 研究者们便对射流碰撞进行了广泛而深入的研究^[3]。在液膜特征方面, Ma 等^[4]和 Chen 等^[5]通过数值模拟研究了双股射流碰撞雾化, 发现液膜是由于表面波纹受气动力放大的影响而破裂, 主要受液体黏度和表面张力的作用。Dombrowski 等^[6]在研究液膜破碎机制过程中进一步发现, 当韦伯数大于某一临界值时, 液膜上才能够出现碰撞波纹。Heidmann 等^[7]指出了射流速度、碰撞角在双股射流碰撞雾化过程中的重要性, 将液膜破碎划分为封闭边缘、边缘有液滴洒落、开放边缘、完全破碎 4 类。Choo 等^[8]发现碰撞角增大、喷嘴内径减小时, 能够产生更薄的液膜。张蒙正等^[9]采用激光全息和图像处理技术, 发现凝胶推进剂相对于水更难雾化, 是由于其表面张力和黏性力较大。Bai 等^[10]发现, 对于黏度较大的液体, 液膜长度更

收稿日期: 2016-03-18

基金项目: 国家自然科学基金创新群体科学基金(51121004)

作者简介: 王 辉(1977—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 王 辉, wanghui_hb@hit.edu.cn

大,喷雾角却更小. Fu 等^[11]发现,在相同压降条件下,矩形喷嘴和椭圆形喷嘴产生的液膜相对于圆形喷嘴产生的液膜更加不稳定. 在雾化后液滴特征方面:Sun 等^[12]发现液滴索太尔平均直径随喷嘴压降增大而减小,而均匀度指数随喷嘴压降增大而增大. 高继慧等^[13]利用数值模拟分析了各因素对雾化液滴粒径的影响,得到了压力喷嘴下游流场内液滴粒径和速度空间分布. Lai 等^[14]首先通过摄影图像技术研究了水的射流碰撞雾化,发现较大黏度和表面张力的液体对应的液滴尺寸都相对较大. Chen 等^[15]利用时间分辨粒子图像测速研究了撞击角度和射流压差对凝胶推进剂雾化后液滴速度的影响,结果表明:雾化液滴速度对于撞击轴线呈单峰对称分布,距离撞击点越远,雾化液滴速度越小且分布越均匀,增大撞击角和增大射流压差都可提高凝胶推进剂有效撞击速度.

虽然前人对于撞击式射流的破碎模式、雾化效果等方面取得了很多研究成果,然而仍缺乏一些条件下黏度、射流速度、碰撞角度等因素对喷雾角、液

滴粒径及分布的具体影响的详细信息,且采取的测试手段、分析手段及得出的结果也不尽相同.

本文基于自主搭建的射流碰撞雾化实验台,采用 CCD 高清拍摄技术,对去离子水及不同浓度的甘油溶液的双股射流碰撞的雾化特征及粒度特征进行记录测量,以探究射流速度、碰撞角度、黏度等因素的影响,获得对碰撞射流系统更加深入的理解,从而指导液体火箭发动机喷嘴的优化设计,提高燃烧效率.

1 实验系统及方法

图 1 为射流碰撞雾化系统示意图,主要包括压力-流量调节系统、储液系统、压力测量系统、方位调节喷射系统 4 部分. 实验采用高压氮气作为驱动力,经过压力调节系统作用在储液系统中的实验工质上,使工质流经流量调节系统和方位调节喷射系统,以一定的射流速度、碰撞角度和喷射直径进行碰撞,得到喷雾场.

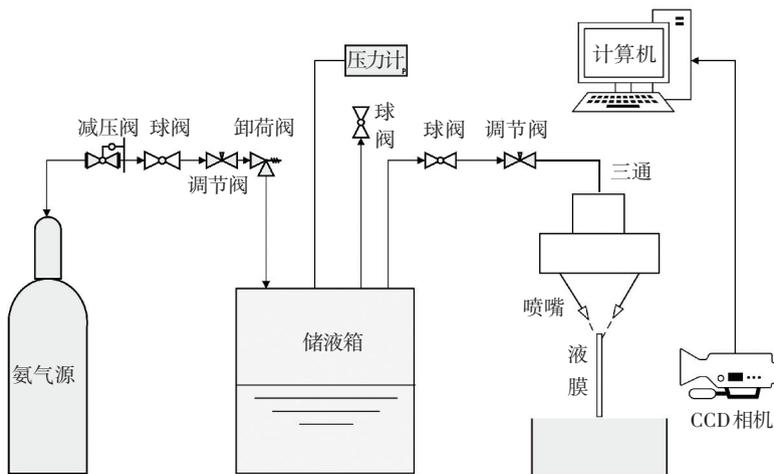


图 1 射流碰撞雾化实验台系统

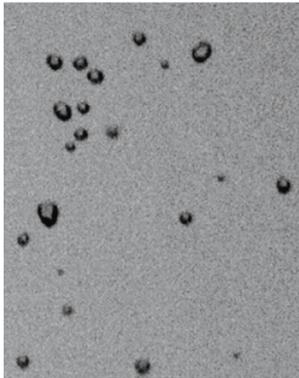
Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

射流碰撞雾化的测量记录采用美国 TSI 公司生产的 CCD 拍照系统,其由计算机、CCD 相机、同步器、标定及坐标架系统构成,可以完全满足喷雾场的测量需要. 根据测量条件,分辨率为 $2\ 048 \times 2\ 048$,同步器根据设定的延迟时间、间隔时间对信号进行同步,实现 CCD 相机的拍照. 实验前需要调焦获得清晰图像后进行标定. 实验得到的图像通过 IPP6.0 软件进行处理,得到喷雾角和液滴粒径. IPP6.0 软件支持彩色图像和多阈值测量,利用对象的颜色特征将其从背景中分离出来,并对对象进行计数和属性测量. 利用此软件,能够快速、自动地对喷雾场的液滴进行识别并测量平均粒径,对像素模糊点还可以采取手动模式进行修正. 图 2 为利用 IPP6.0 处理液滴粒径和喷雾角的方法与步骤. 由于液滴具有三维

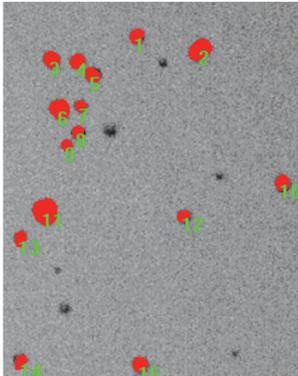
结构,而 CCD 相机拍摄是二维测量,对于单个非球形液滴来说,不能够准确描述其粒径及形态. 在统计测量液滴时,通过选取大量液滴来抵消其中产生的误差. 同一工况下,通过连拍 20 张照片,每张照片在同一位置自动识别 15 个液滴,取平均值计算得到索太尔平均直径. 经过重复实验比较,误差较小,在可接受范围内.

实验采用控制变量法,分别研究射流速度、碰撞角度、喷嘴内径、黏度对雾化质量的影响,衡量指标为液滴粒径、雾化均匀度、喷雾角等,所处的环境温度都为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力为常压. 在研究黏度的影响时,实验组为 20%、30%、40% 体积分数的甘油溶液,相关的物理参数见表 1,对照组为去离子水,其他实验以去离子水为工质. 喷嘴出口内径 D 分别为 0.67、

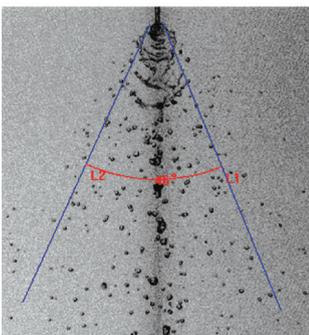
0.86、1.07 mm, 喷嘴长径比都为 10 以上, 使得液体在内部流动时能够充分发展. 为了保证两股射流的对称性, 实验之前对射流速度进行了标定, 发现最大误差不超过 5%, 所以, 可以认为左右两股射流在流速上符合对称的要求.



(a) 团聚物灰度



(b) 团聚物识别



(c) 喷雾角的测量

图 2 图像处理方法

Fig.2 Image processing method

表 1 甘油溶液的物理参数

Tab.1 Physical property of glycerite

甘油溶液体积 分数/%	黏度/ (mPa · s)	密度/ (kg · m ⁻³)	表面张力/ (mN · m ⁻¹)
0	1.005	998	72.8
20	2.025	1 052	72.1
30	3.040	1 078	71.2
40	4.952	1 104	70.2

2 实验结果及分析

2.1 碰撞射流的液膜及破碎特征

图 3 为不同射流韦伯数下去离子水碰撞射流的喷雾结构. 可以看出, 随着韦伯数增加, 双股射流碰撞后形成的液膜在破碎模式上存在较大的差异. 图 3(a) 为左右两股射流碰撞之后形成的液膜具有规则封闭边缘, 并且液膜的边缘相对较厚, 液滴没有在边缘脱落, 而是全部在液膜下方滴落, 不存在张角, 液膜表面存在波动, 伊吉明等^[16]认为是由冲击波造成的. Dombrowski 等^[6]发现液膜出现波纹时韦伯数临界值介于 66~165, 本文实验在韦伯数为 39 时就观察到波纹的出现, 存在差异的原因可能在于本文实验采用的液体为去离子水, Dombrowski 等所采用的水经过染色, 使得水的特性有微小的差异. 图 3(b) 同样是封闭边缘, 但此时液膜底部两侧开始出现液丝, 由于液体的表面张力作用, 液丝出现断裂, 形成液滴. 图 3(c) 显示液滴数量继续增加, 并且液滴开始向两侧发展, 出现喷雾角. 因此, 当韦伯数较小时, 液膜都有着较为完整而规则的边缘, 并且液膜大小随着韦伯数逐渐增大. 图 3(d) 的液膜边缘开始出现破裂, 变得不再连续而规则, 并且液膜表面出现明显的表面波, 这是由于在气液交界面上液膜受到外界空气的扰动作用而在其表面形成波纹, 因此又被称为空气扰动波, 底部液膜出现剥离, 然后逐渐破碎形成液滴. 由图 3(e) 中可以看出, 液膜在底部破裂后收缩形成的液丝呈弓形, 喷雾角继续增大. 在图 3(f)~3(h) 中, 已经很难看出射流碰撞形成液膜的边缘, 称为无边模式. 随着韦伯数增加, 液膜出现破裂的位置越来越接近于射流的碰撞点, 这说明空气扰动波随着韦伯数的增加而逐渐加强. 在无边模式下, 周期性弓形液丝在向下运动过程中, 不断破碎而出现大量液滴.

图 4 为不同射流韦伯数下 20% 体积分数甘油溶液的碰撞射流的喷雾结构. 与相同条件下去离子水的喷雾结构类似, 当韦伯数增大时, 双股射流碰撞形成的液膜间存在较大的差异. 相对于同样状态下的去离子水, 甘油溶液液膜波纹出现得要晚一些, 即甘油溶液液膜波纹的出现需要更大的射流速度, 这是因为甘油溶液黏度较大, 轻微的波动难以在液膜上表现出来.

对浓度较高的甘油溶液进行双股射流碰撞雾化实验时的结果见图 5, 此时甘油体积分数为 40%, 韦伯数为 90 (对应射流速度为 2.58 m/s). 射流碰撞形成一个规则的叶子型液膜, 液膜下方垂直方向存在一个较小的液膜 (图中中间直线部分), 在这个小液

膜的下方垂直方向又存在一个更小的液膜,把这种现象称为液膜翻转.液膜翻转现象一般出现在高黏度液体碰撞时,因为高黏度流体液膜较为稳定,对碰撞波和空气的扰动作用抵抗能力强,而在其他条件

下,液膜边缘可能存在不规则的凸起,影响新射流碰撞,液膜翻转现象不会出现,或者仅存在两个相互垂直的液膜.

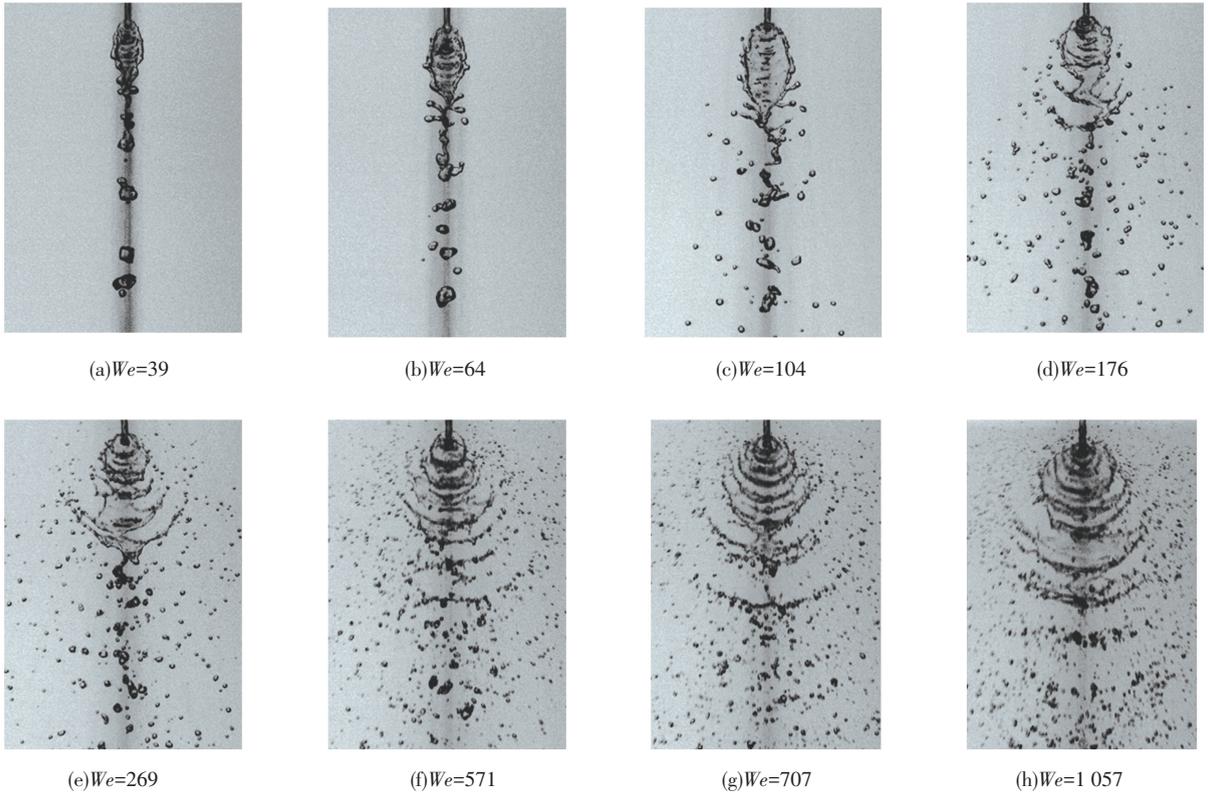


图 3 去离子水不同韦伯数下喷雾场图像

Fig.3 Water impinging spray images at different Weber number

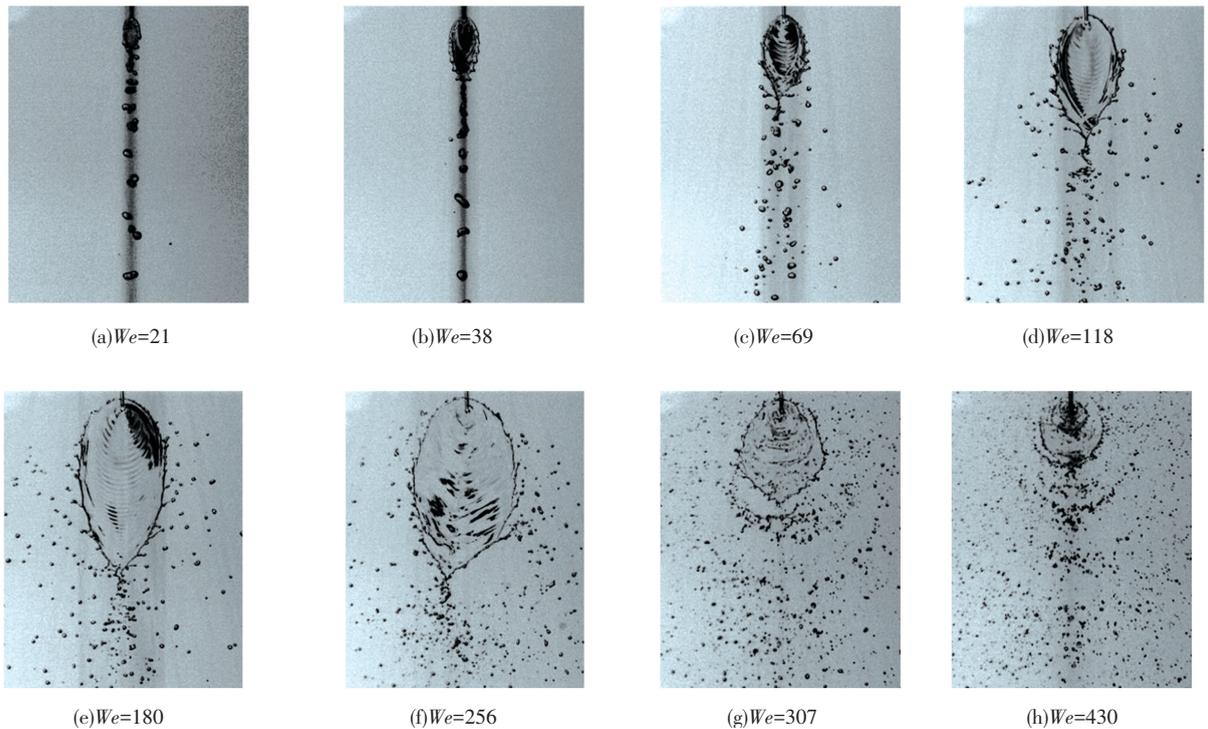


图 4 20%甘油溶液不同韦伯数下喷雾场图像

Fig.4 Glycerite impinging spray images at different Weber number

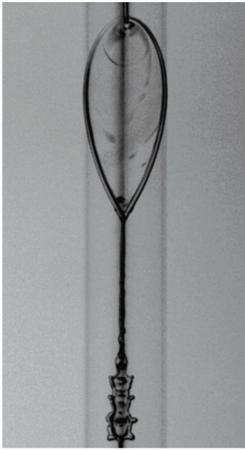
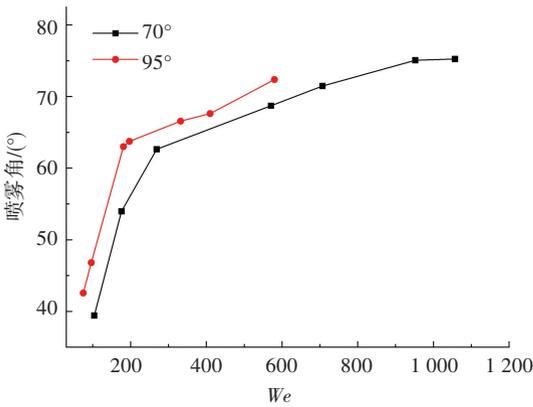


图 5 液膜翻转现象

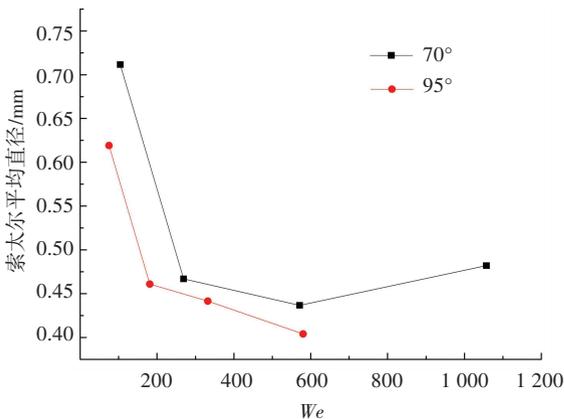
Fig.5 The phenomenon of liquid sheet flip

2.2 不同射流速度对雾化效果的影响

在研究射流速度对去离子水雾化效果的影响时,以射流速度为变量,固定碰撞角和喷嘴出口内径不变.图 6(a)给出了韦伯数对喷雾角的影响.可以看出,当韦伯数增大时,双股射流碰撞形成的喷雾角将随之增大.在较小的韦伯数条件下,喷雾角增速较快;而当韦伯数处于较高范围时,喷雾角增加较慢,并且逐渐趋于稳定.



(a) 韦伯数对喷雾角的影响



(b) 韦伯数对索太尔平均直径的影响

图 6 韦伯数对喷雾角和索太尔平均直径的影响

Fig.6 Effects of Weber number on spray angle and SMD

在测量双股射流碰撞形成的喷雾场中液滴的粒径时,选定射流碰撞点正下方某一固定区域进行测量,根据在实验过程中拍摄到的喷雾场图像,发现在碰撞点下方 6 cm 处,液膜已经完全破碎形成液滴,不存在块状液膜或者液丝,所以选择此处作为测量区域.图 6(b)给出了 75°和 90°两种射流碰撞角条件下,韦伯数对液滴粒径的影响.总体上,随着韦伯数增大,液滴的平均粒径会随之减小,并且减小趋势变得平缓,最后稳定在 0.4 mm 以下.这是因为较大的韦伯数意味着射流速度较大,液膜破碎形成的大液滴相对于周围空气的运动速度大,能够更容易继续破裂形成小液滴.在实验过程中,受测量条件限制,设定曝光时间最小为 10 μs,所以在拍摄速度较高的液滴时,照片上会留有很小的一段液滴运动轨迹,使得液滴粒径测量值偏大,反应在图中即 75°韦伯数大于 600 之后,索太尔平均直径有微弱的变大的趋势;而当液滴速度较小时,曝光时间对粒径测量值的影响并不明显,液滴的平均粒径随着韦伯数的增大而减小.

2.3 不同碰撞角度对雾化效果的影响

在研究不同碰撞角对雾化效果的影响时,同样以去离子水为实验工质,所采用的喷嘴内径为 0.86 mm,保持射流速度不变,对比研究了 60°、75°、90°、105°等 4 种碰撞角对雾化效果的影响.图 7(a)给出了 4 种韦伯数状态下,不同的碰撞角对喷雾角的影响.由图 7(a)可以看出,无论是在何种韦伯数条件下,当碰撞角增加时,喷雾场都会随之增大,在韦伯数处于较大范围时,同种碰撞角下的喷雾角差距相对较小.

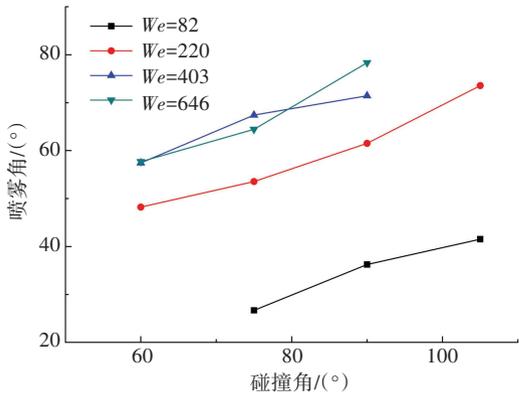
图 7(b)给出了在不同韦伯数条件下,射流碰撞角对雾化形成液滴粒径的影响.可以看出,在韦伯数保持不变时,随着双股射流间碰撞角的增大,液滴的平均直径将会逐渐减小,说明增大碰撞角有利于改善雾化.这是因为碰撞角增大时,左右两股射流更加接近于正碰,动量交换变得更剧烈,从而使液膜的不稳定性加强,加速了液膜的破碎.在应用双股射流碰撞雾化时,要选择合适的碰撞角,不能单独依靠增加碰撞角改善雾化,因为根据喷雾场图像,在喷雾角为 90°或 105°时,液膜接近于圆形,会有较多的液滴向上传播一定的距离,这可能会引起严重的粘壁现象.

图 7(c)给出了不同韦伯数时,液滴粒径的方差随碰撞角的变化.总体上,随着左右两股射流间的碰撞角增大,液滴粒径方差逐渐减小,即液滴更为集中地分布在粒径均值(算术平均值)附近,液滴与液滴之间的粒径差值减小.同时,当无论是在何种碰

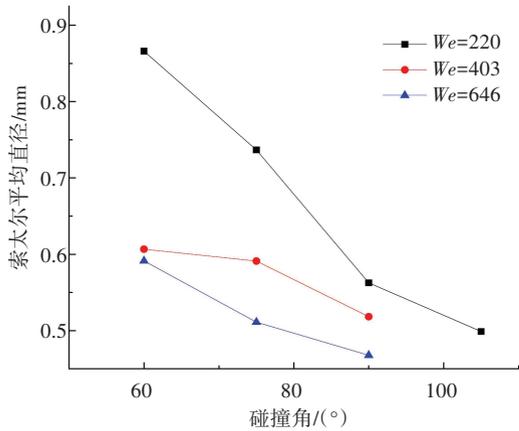
撞角时,韦伯数较大的条件下雾化产生的液滴粒径方差都较小.这是因为在小韦伯数(小流速)、小碰撞角时,射流碰撞比较温和,液膜较为稳定,仅在扰动较强的地方液膜破碎形成小液滴,而在其他区域,破裂的液膜在表面张力作用下汇聚形成体积较大的液滴,最终表现为液滴大小不一;而当韦伯数较大,或者碰撞角较大时,射流碰撞更为剧烈,液膜容易破碎形成液滴,这种差异性会有所减小.

2.4 不同出口内径对雾化效果的影响

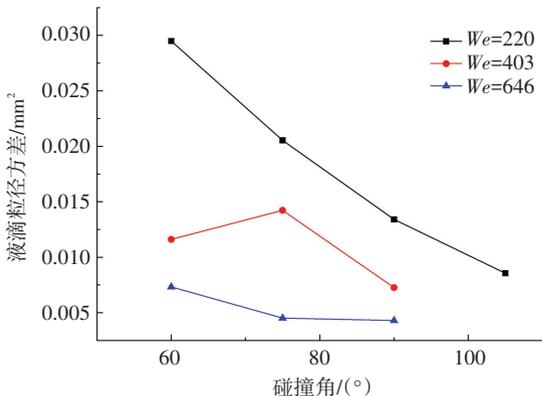
图 8(a)分别给出了 3 种不同出口内径的喷嘴产生射流的韦伯数对喷雾角的影响,可以发现,无论对于何种内径的喷嘴,当韦伯数增加时,喷雾角都会随之增大,而后逐渐趋于稳定. 出口内径为 0.86、1.07 mm 的两种喷嘴形成喷雾的张角在不同韦伯数时都较为接近,且都要大于出口内径为 0.67 mm 喷嘴形成的喷雾角. Dombrowski 等^[6]研究了层流与湍流射流形成的液膜及破碎,通过比较发现了不同的破碎机理,并发现液膜的破碎是由空气动力学和水动力学作用而产生的波纹扰动引起. 液膜破碎的过程受到周围空气的扰动作用,当喷嘴内径较小时,双股射流碰撞形成的液膜比较薄,同时,Heidmann 等^[7]的研究表明,喷嘴内径对液膜表面的波纹具有微弱的影响,小内径喷嘴形成的液膜波纹更为密集一些,综合这两项原因,轻微的扰动就能使之形成的液膜破裂,不易于向两侧传播,因而最终的喷雾角较小. 对于内径为 0.86、1.07 mm 的两种喷嘴,双股射流碰撞形成的液膜较厚,能够抵抗更强的空气扰动作用,所以液膜能够在宽度方向上传播更远,并且,0.86 mm 的喷嘴形成的液膜厚度足以抵抗空气的扰动,所以两者的喷雾角更大且较为接近.



(a) 碰撞角对喷雾角的影响



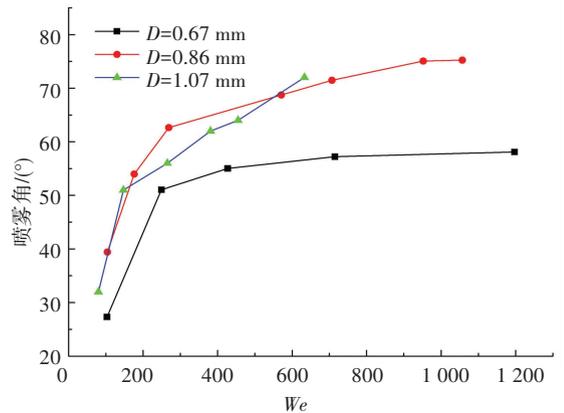
(b) 碰撞角对索太尔平均直径的影响



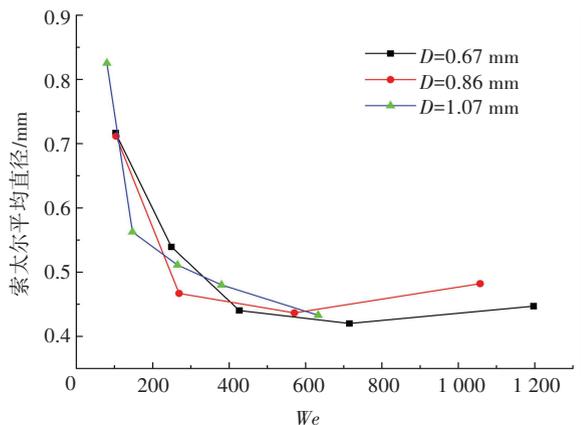
(c) 碰撞角对液滴粒径方差的影响

图 7 碰撞角对喷雾角、索太尔平均直径、液滴粒径方差的影响

Fig.7 Effects of impinging angle on spray angle, SMD and variance



(a) 喷嘴内径对喷雾角的影响



(b) 喷嘴内径对索太尔平均直径的影响

图 8 喷嘴内径对喷雾角和索太尔平均直径的影响

Fig.8 Effects of nozzle inner diameter on spray angle and SMD

图 8(b) 给出了采用 3 种不同出口内径的喷嘴形成喷雾场中液滴的平均粒径随韦伯数的变化趋势, 可以看出随着韦伯数增大, 液滴平均直径会随之减小. 尽管喷嘴内径能够影响到韦伯数的大小, 但从图中可以看出 3 种喷嘴形成的液滴在大小上并没有较大的区别, 可见, 在所研究的范围内喷嘴尺寸对液滴粒径影响较小, 这与前人的研究结果相同. 对于内径为 0.67、0.86 mm 的两种喷嘴, 可以发现, 在液滴粒径随韦伯数变化曲线的后半段有所上升, 这是因为射流碰撞产生的液滴速度较大, 曝光时间偏长导致液滴粒径的测量值偏大.

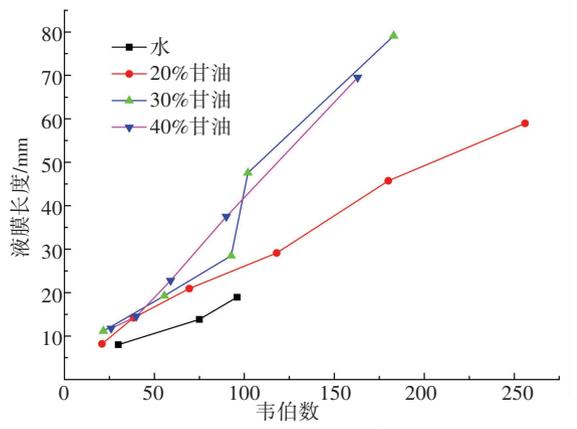
2.5 不同黏度对雾化效果的影响

图 9(a) 给出了去离子水及各种浓度的甘油溶液形成液膜的长度随韦伯数的变化, 因为液膜的纵横比接近 2, 且随韦伯数变化较小, 所以可以用液膜长度来表征液膜大小. 可以看出, 当韦伯数增大时, 液膜将逐渐增大, 并且对于黏度较大液体, 其液膜尺寸也较大. 对于黏度较高的甘油溶液来说, 即使处于较大的射流速度时, 液膜也不易破裂.

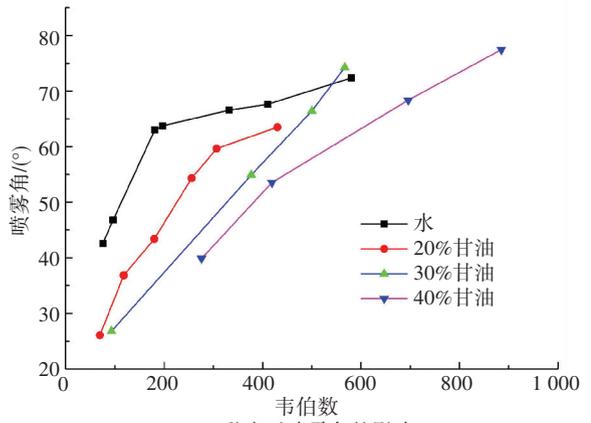
图 9(b) 给出了内径为 0.86 mm 的喷嘴, 在 90° 碰撞角时形成的喷雾场张角随韦伯数变化趋势. 可以看出, 当韦伯数增大时, 去离子水和甘油溶液形成的喷雾角都会随之增大, 甘油溶液形成的喷雾角与韦伯数大致呈线性关系, 并且浓度越高, 喷雾角越小. 这主要是由两方面原因造成的: 浓度较高的甘油黏度大, 液膜发展受到的阻力大, 因而张角较小; 甘油的密度约为 $1.26 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 比去离子水的密度大, 浓度越高的甘油溶液密度越大, 因而液膜在向两侧传播时受到的重力作用将更加明显, 使得喷雾角随甘油溶液浓度增大而减小.

图 9(c) 给出了去离子水、20% 体积分数甘油溶液、30% 体积分数甘油溶液的液滴平均直径随韦伯数的变化, 可以发现, 3 种液体雾化形成的液滴直径随韦伯数的变化趋势一致. 并且, 无论是在何种韦伯数条件下, 高浓度 (高黏度) 的甘油溶液相对于低浓度的甘油溶液, 雾化形成的液滴平均直径更大.

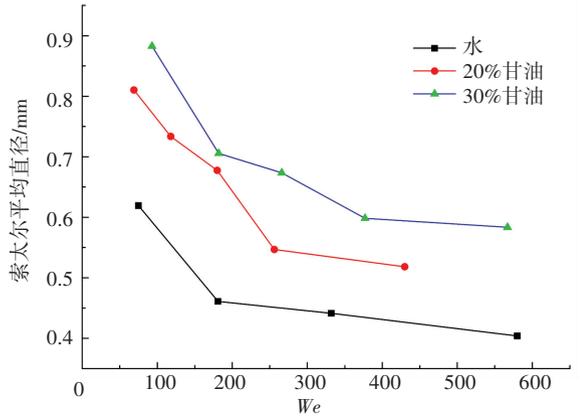
图 9(d) 为去离子水、20% 体积分数甘油、30% 体积分数甘油 3 种液体雾化形成液滴粒径的方差随韦伯数的变化趋势. 对于大体积分数的甘油溶液, 其在雾化后产生的液滴粒径方差更大, 即液滴粒径均匀性差, 彼此之间差距大. 这是因为高浓度意味着高黏度, 液膜更加稳定, 产生的液滴大小不一. 当韦伯数较大时, 黏度对液滴的影响将会减弱, 因而粒径的方差将会较为接近.



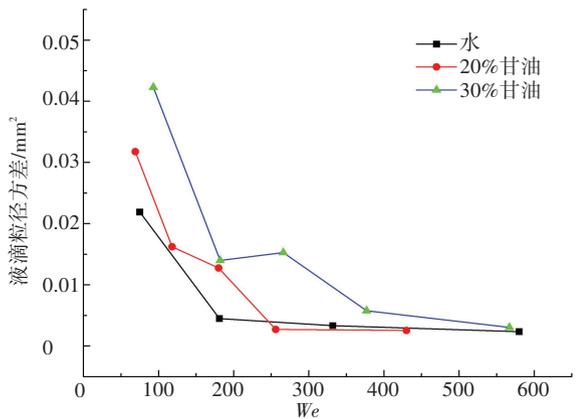
(a) 黏度对液膜长度的影响



(b) 黏度对喷雾角的影响



(c) 黏度对索太尔平均直径的影响



(d) 黏度对液滴粒径方差的影响

图 9 黏度对液膜长度、喷雾角、索太尔平均直径、液滴粒径方差的影响
Fig.9 Effects of viscosity on sheet length, spray angle, SMD and variance

3 结 论

1) 增大韦伯数, 液膜会表现出不同的特征. 在韦伯数较小时, 液膜具有较厚并且封闭的边缘, 表面有波纹出现. 随着韦伯数增大, 液膜两侧出现液丝, 液丝在与周围空气相对运动过程中破碎产生液滴, 喷雾场呈现一定的张角, 并且随韦伯数增大而增大.

2) 增大两股射流间的碰撞角, 有利于液膜向两侧发展, 喷雾场张角增大. 同时, 增大碰撞角后, 射流接近于正碰, 碰撞更加剧烈, 液膜不稳定性增强, 液滴平均直径减小.

3) 内径较小的喷嘴形成的液膜比较薄, 表面波纹更为密集, 稳定性差, 轻微的外界扰动就能使之破裂, 不利于液膜向两侧传播, 最终导致喷雾角较小. 喷嘴内径较大时, 内径值对喷雾角的影响较小. 在所研究的范围内, 液滴的平均直径不受喷嘴内径的影响.

4) 对于不同黏度的液体来说, 韦伯数的增大都能够引起液膜尺寸增大, 并且, 黏度较大的液体在相同韦伯数时对应的液膜尺寸更大. 黏度较高的液体的喷雾角较小. 韦伯数较小时, 高黏度液体形成的液膜更为稳定, 液滴平均直径较大; 而当韦伯数较大时, 黏度对液滴的影响变小, 不同黏度的液体对应的液滴直径差异较小. 黏度较大的液体, 在低流速条件下, 容易出现液膜翻转现象.

5) 增大射流速度, 增大碰撞角, 减小液体黏度, 这些有利于增强液膜不稳定性的因素都能够使得雾化形成的液滴分布更加集中.

参 考 文 献

- [1] OEFELEIN J C, YANG V. Comprehensive review of liquid-propellant combustion instabilities in F-1 engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(5): 657-677, DOI: 10.2514/3.23674.
- [2] RYAN H M, ANDERSON W E, Pal S, et al. Atomization characteristics of impinging liquid jets[J]. Journal of Propulsion and Power, 1995, 11(1): 135-145.
- [3] HUANG J C P. The break-up of axisymmetric liquid sheets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 43: 305-319.
- [4] MA D J, CHEN X D, KHARE P, et al. Atomization patterns and breakup characteristics of liquid sheets formed by two impinging jets[J]. AIAA Paper, 2011, 97: 2011, DOI: 10.2514/6.2011-97.
- [5] CHEN X, MA D, YANG V, et al. High-fidelity simulations of impinging jet atomization[J]. Atomization and Sprays, 2013, 23(12): 1079-1101, DOI: 10.2514/6.2012-4328.
- [6] DOMBROWSKI N D, HOOPER P C. A study of the sprays formed by impinging jets in laminar and turbulent flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1964, 18(3): 392-400.
- [7] HEIDMANN M F, PRIEM R J, HUMPHREY J C. A study of sprays formed by two impinging jets[J]. World Literature Today, 1957(4): 681-682.
- [8] CHOO Y J, KANG B S. Parametric study on impinging-jet liquid sheet thickness distribution using an interferometric method[J]. Experiments in Fluids, 2001, 31(1): 56-62.
- [9] ZHANG M Z, CHEN W, YANG W D, et al. Atomization and characteristics of gelled propellant with impinging injector[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(1): 46-51.
- [10] BAI F, DIAO H, ZHANG M, et al. Breakup characteristics of power-law liquid sheets formed by two impinging jets[J]. Fluid Dynamics Research, 2014, 46(5): 055506, DOI: 10.1088/0169-5983/46/5/055506.
- [11] FU Q, YANG L, CUI K, et al. Effects of orifice geometry on gelled propellants sprayed from impinging-jet injectors[J]. Journal of Propulsion and Power, 2014, 30(4): 1113-1117, DOI: 10.2514/1.B35144.
- [12] SUN J, WANG J, SHEN C, et al. Experimental for a like-doublet injector with 40° impingement angle[J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(3): 207-206.
- [13] 高继慧, 陈国庆, 高建民, 等. 半干法压力旋流式喷嘴雾化性能数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(3): 437-441.
GAO J H, CHEN G Q, GAO J M, et al. Numerical simulation on atomizing performance of pressure swirl nozzle for semi-drying FGD[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(3): 437-441.
- [14] LAI W H, HUANG W, JIANG T L. Characteristic study on the like-doublet impinging jets atomization[J]. Atomization and Sprays, 1999, 9(3): 277-289.
- [15] CHEN J, FENG F, HU M A, et al. Experimental study on impinging velocimetry of gel simulants based on PIV[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 2014, 35(4): 565-569.
- [16] 伊吉明, 白富强, 常青, 等. 撞击式射流速度特性及液滴粒度特性的实验[J]. 内燃机学报, 2013, 31(6): 519-524.
YI J M, BAI F Q, CHANG Q, et al. Experiment on velocity and size distribution of droplets produced by an impinging liquid jet[J]. Neiranji Xuebao/transactions of Csice, 2013, 31(6): 519-524.

(编辑 杨波)