

文章编号:1006-9941(2024)04-0360-09

不等径开放式撞击流雾化特征及二乙二醇/水体系混合研究

梁鹏飞,陈锦芳,赵美玲,张国辉,王雅丽

(山西北方兴安化学工业有限公司,山西太原 030008)

摘要: 采用粒子图像测速技术(PIV)对不等径开放式撞击流中质量分数60%的甘油-水溶液雾化性能进行了研究,探讨韦伯数 We ($51 \leq We \leq 1605$)、入射速度 u ($2.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq u \leq 6.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、喷嘴直径(喷嘴1:左侧喷嘴直径(D_1)=1.5 mm,右侧喷嘴直径(D_2)=2 mm;喷嘴2: $D_1=2 \text{ mm}$, $D_2=3 \text{ mm}$)对液膜破碎特征及液滴行为的影响,并对复合含能材料粘结剂溶剂二乙二醇与水混合过程的液滴分布进行了研究。结果表明:随着 We 增大,液膜破碎长度先增大,当液膜破碎模式到达无边缘模式后减小,且液膜厚度与液滴直径逐步减小,液滴速度逐步增大;随喷嘴直径增大,液膜破碎模式变化不显著,液膜破碎长度、厚度、液滴直径均增大,液滴速度则逐步减小。同时,拟合得到液膜破碎长度、液膜厚度、液滴索特平均直径 $D[3,2]$ 与喷嘴直径、韦伯数间的经验关联式,采用二乙二醇与水体系验证后发现,随入射速度增大,二乙二醇与水撞击混合后液滴直径减小,分布变窄, $D[3,2]$ 数值在经验关联式 $\pm 15\%$ 误差范围内与理论预测结果一致。

关键词: 开放式撞击流;不等径;粘结剂溶剂;液膜破碎特征;液滴行为

中图分类号: TJ55; TQ027

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023078

0 引言

撞击流反应器广泛用于气-固、固-固、气-液、液-液等不同体系的混合^[1]。其中,开放式撞击流反应器结构简单、混合效率高、工艺简单、雾化效果好,被广泛应用于发动机燃烧系统以及含能材料的制备^[2-4]。学者们对开放式撞击流中液膜破碎模式、液膜破碎特征、破碎长度、液滴尺寸、破碎机理等方面进行了大量的实验研究^[5-11]。Huang^[5]采用高速相机描述了破碎长度,当韦伯数 We 为 $100 < We < 500$ 时,破碎半径随 We 增加而增大; $We > 2000$,破碎半径随 We 增加而减小, $500 < We < 2000$ 时破碎状态属于过渡阶段, $800 < We < 1000$ 时破碎半径最大。Dombrowsk^[6]采用频闪摄像法分析液体破碎的影响因素,发现液滴尺寸与破碎机制密切相关,撞击后撞击面表面的波状扰动是导致液膜发展破碎的重要原因;Li^[7]认为不同喷嘴出口速度产生的流场不稳定性分为两个主要的状态:低流速-毛细不稳定性和高流

速K-H不稳定性;Jung^[8]认为Plateau-Rayleigh不稳定性使流体破碎成为液滴,并形成“鱼骨”结构;Erni^[9]认为液滴破碎机制为液膜边缘的R-P不稳定性,当流体黏度增大,表面张力不足以满足R-P不稳定性,液滴最终在喷嘴/出口下游破碎;Lai^[10]发现射流速度较小时,高黏度和高表面张力的液体撞击破碎形成较大的液滴,但超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,黏度和表面张力对液滴的大小几乎没有影响。Xia^[11]采用高速相机对开放式撞击流两流体撞击后液滴尺寸、速度分布进行了研究,结果表明平均液滴直径与韦伯数成比例。从以上研究可以看出,对于撞击流破碎特征及机理、液滴尺寸等方面取得了一定的研究成果,但设备参数、流体性质对液滴破碎特征和液滴行为影响的研究仍不全面。

目前,撞击流反应器已被应用于含能材料领域,制备粒径均匀且分布窄的复合含能材料,如张小宁等^[12-13]采用撞击流反应器制备出了亚微米级的奥克托今(HMX)、硝胺炸药(如黑索今RDX),其中HMX粒径小于 $1 \mu\text{m}$ 的约占总数的70%,有效粒径为 612.2 nm ;陈潜等^[14]利用高速撞击流法可制备出粒径小于 100 nm 的纳米级HMX炸药颗粒。但尚未开展针对撞击流反应器破碎及雾化特征影响复合含能材料制备机

收稿日期:2023-04-06;修回日期:2023-08-09

网络出版日期:2023-12-26

作者简介:梁鹏飞(1992-),男,工程师,主要从事火炸药制造研究。e-mail:1013535279@qq.com

引用本文:梁鹏飞,陈锦芳,赵美玲,等.不等径开放式撞击流雾化特征及二乙二醇/水体系混合研究[J].含能材料,2024,32(4):360-368.

LIANG Peng-fei, CHEN Jin-fang, ZHAO Mei-ling, et al. Atomization Characteristics of Free Impinging Jets with Unequal Nozzle Diameter and Mixing of Diethylene Glycol-water Solution[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(4):360-368.

理的研究,因此,理解和控制撞击流反应器破碎及雾化特征,对于复合含能材料的制备具有重要意义。

王杰超^[15]通过快速膜乳化(PME)技术辅助乳液悬浮组装制备 HMX/聚叠氮缩水甘油醚(GAP)/硝化纤维素(NC)(20/56/24)微球,其中油水比例为 1:3; Alviso 等^[16]研究了 3-聚氰胺甲醛(MF)凝胶结构与反应物配比的关系,发现当 3-聚氰胺与甲醛物质的量比为 1:3.7 时, MF 凝胶孔径大,达到 10~50 nm。从以上研究可以看出,复合含能材料的制备通常不是体积比为 1:1 的混合,采用等直径的开放式撞击流反应器,撞击点容易偏离中心从而影响制备出复合材料的均匀性和粒径分布^[17]。因此,本研究使用质量分数为 60% 的甘油-水溶液体系对不等径开放式撞击流反应器内液膜破碎特征、液滴直径及速度等雾化行为特征进行研究,探究液膜破碎长度、液膜厚度、液滴直径与各外控参量(喷嘴直径、入射速度、韦伯数)的关联性及其雾化机理,并用含能材料常用粘结剂溶剂乙二醇与水混合进行验证,以期优化撞击流反应器的结构,为复合含能材料制备以及火箭发动机液体推进剂混合设备的优化提供指导。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

甘油,国药集团化学试剂有限公司,分析纯;水,去离子水;乙二醇,分析纯,武汉华翔科洁生物技术有限公司。

不等径开放式撞击流反应器采用 3D 打印技术设计并加工,其结构如图 1 所示,有 2 种结构:喷嘴 1 ($D_1=1.5\text{ mm}$, $D_2=2\text{ mm}$)和喷嘴 2 ($D_1=2\text{ mm}$, $D_2=3\text{ mm}$)。 D_1 为左边喷嘴直径, mm; D_2 为右边喷嘴直径, mm。

粒子图像测速技术 (particle image velocimetry Technology, PIV) 系统,美国 TSI 公司;激光器, Nd: YAG; CCD 相机, 630092, 曝光时长 300 ns, 最大帧率 72 帧/秒。

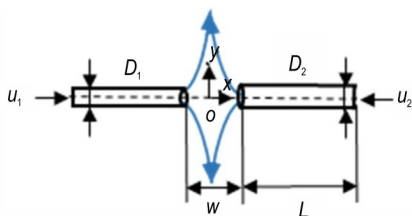


图 1 不等径开放式撞击流结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of free impinging jets with unequal nozzle diameter

1.2 样品制备

60G 样品:取甘油与去离子水混合制成 1 L 质量分数为 60% 的甘油-水溶液(60G),分别贮藏在两个储液槽中备用。60G 的密度、黏度与乙二醇相近,而乙二醇作为粘结剂溶剂,常用于溶解 GAP 和 NC,制备性能互补的复合含能粘结剂。因此,研究采用 60G 模拟开展相关的研究。

乙二醇-水溶液:取复合含能材料粘结剂溶剂乙二醇和去离子水各 1 L,分别贮藏在两个储液槽中备用,经不等径开放式撞击流反应器等动量撞击混合后形成乙二醇-水溶液。

1.3 实验装置系统

实验系统如图 2 所示,包括 3 个部分:流体输送系统、不等径开放式撞击流及 PIV 系统。60% 甘油-水溶液储存在储液槽中,经过泵和流量计进入不等径开放式撞击流反应器的入射管中,并从喷嘴中喷出,在开放的空间中撞击。激光器发射出两束独立的 532 nm 绿色激光照亮拍摄区域,同时 CCD 相机拍摄 3312 像素×2488 像素的 500 组照片,从而获得流体撞击后的雾化特征。

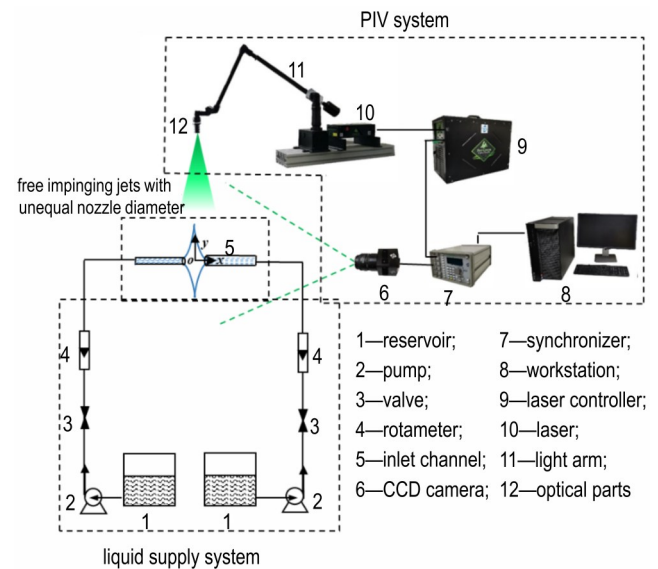


图 2 不等径开放式撞击流雾化特征实验系统

Fig.2 Experimental system for atomization characteristics of free impinging jets with unequal nozzle diameter

1.4 实验设计

在不同韦伯数、入射速度、喷嘴直径(喷嘴 1 和喷嘴 2)下,采用 1.3 的实验系统研究 60G 撞击后液膜破碎特征和液滴行为以及乙二醇与水撞击混合后的液滴分布,实验操作参数如表 1 所示。实验温度为 20 °C,压力为 101.325 kPa。由于 60G 黏度的影响,

表1 实验操作参数

Table 1 Experimental conditions

working fluid	nozzle type	V / mL·min ⁻¹	u / m·s ⁻¹	Re	We	spatial resolution / pixel·mm ⁻¹
60%glycerol-water	1	250-500	1.33-2.65	283-565	51-205	23.26
		600-1000	3.18-5.31	678-1130	295-819	19.23
		1100-1400	5.84-7.43	1243-1583	991-1605	23.26
	2	400	2.12	452	131	23.26
		500-1000	2.65-5.31	565-1130	205-819	19.23
		400	2.12	4216	124	23.26
diethylene glycol-water	1	600-1000	3.18-5.31	6325-10542	279-774	19.23
		1200, 1400	6.37, 7.43	12650, 14758	1115, 1517	23.26
	2	400	2.12	133	147	23.26
		600-1000	3.18-5.31	199-332	330-916	19.23

Note: V is flow rate, u is jet velocity, Re is Reynolds number, We is Weber number.

不同入射速度下拍摄的距离不同,相应的分辨率也不同,各入射速度下的分辨率如表1所示。

1.5 雾化特征表征

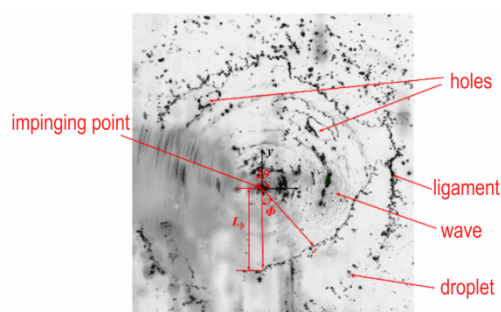
研究采用PIV技术和Image Pro-Plus对60G撞击后液膜破碎特征、液膜破碎长度、液膜厚度、液滴直径及液滴速度等雾化特征进行研究,具体表征方法如下:

液膜破碎特征: Kampen^[18]和Ma^[19]观察到,随着射流速度的增加,破碎模式分为闭合边缘模式(M1)、开放边缘模式(M2)、无边缘模式(M3)、波或韧带模式(M4)和完全展开模式(M5)。当处于M1模式时,液膜稳定、较厚且闭合的边缘不会破碎,在下游形成像链条一样排列的流体链;当处于M2模式时,液膜的边缘出现孔,液膜边缘变得不完整;当处于M3模式时,液膜边缘孔增多,很难观察到完整的液膜边缘,同时液膜上会产生不稳定的波纹;当处于M4模式时,液膜上的表面波从边缘延伸到撞击点,撞击点附近开始出现孔洞,液膜边缘形成“弓形韧带”,液膜观察不到完整的边缘;当处于M5模式时,液膜更加不稳定,液膜边缘形成了“网状结构”,形成了雾化。如图3所示为波或韧带模式^[20]。

液膜破碎长度: 破碎长度 L_b 采用Image Pro-Plus软件对所拍摄的500组照片进行测量计算得到平均值,如图3所示,定义撞击点到完整的液膜边缘的距离为破碎长度 L_b ^[20]。

液膜厚度: 液膜厚度 T_s 采用Image Pro-Plus软件对所拍摄的500组照片进行测量计算得到平均值,如图3所示,定义为方位角 $\varphi=90^\circ$ 时液膜厚度为 T_s 。

液滴直径: 液滴直径的测量采用文献[20-21]中的方法,通过液滴的最大长度及最小长度计算不规则

图3 不等径开放式撞击流液膜特征^[20]Fig. 3 Liquid sheet characteristics of free impinging jets with unequal nozzle diameter^[20]

液滴直径如式(1)所示,

$$d = \sqrt{d_1 d_2} \quad (1)$$

式中, d 为液滴直径,mm; d_1 为不规则液滴最大长度,mm; d_2 为不规则液滴最小长度,mm。

研究中以喷嘴直径 $D=2$ mm为基准,入射管长度 L 为30 mm,即 $L/D \geq 10$ 从而保证流体在管中的流动是稳定的。喷嘴之间的距离 w 为10 mm,即 $w/D=5$ 。撞击点 o 为坐标原点(0,0,0),平行于两喷嘴的平面为 x - y 平面,垂直于两喷嘴的平面为 y - z 平面。CCD相机拍摄的角度采用文献[20]中的测试参数,即与入射管夹角为 30° 。

以 $D=2$ mm为基准,入射速度 u 的计算如式(2)所示,

$$u = \frac{V}{(\pi/4)D^2} \quad (2)$$

式中, u 为以 $D=2$ mm为基准的入射速度, $m \cdot s^{-1}$; V 以 $D=2$ mm为基准的体积流量, $m^3 \cdot s^{-1}$ 。

雷诺数 Re 的计算如式(3)所示,其中 ν 为流体的

运动黏度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$Re = \frac{Du}{\nu} \quad (3)$$

韦伯数 We 的计算如式(4)所示, 其中 ρ 为流体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; σ 为流体的表面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

$$We = \frac{\rho u^2 D}{\sigma} \quad (4)$$

液滴索特平均直径 $D[3, 2]$ 的计算如式(5)所示, 其中 n_i 为直径不同的第 i 种液滴的数量; d_i 为直径不同的第 i 种液滴的直径^[21], μm 。

$$D[3, 2] = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (5)$$

液滴速度: 采用 Insight 4G 的后处理软件^[20]对拍摄的 500 组照片进行处理, 得到每组照片的液滴速度, 然后采用 Tecplot 软件对计算后的液滴速度求平均值得到不同平面上不同位置液滴的平均速度、轴向平均速度 V 和径向平均速度 W 。

2 结果与讨论

2.1 60G 撞击液膜破碎特征分析

为了使撞击点保持在两喷嘴之间的中心位置, 所有研究保持动量比为 1。不同入射速度(韦伯数)($u(We)$)下 2 种喷嘴的液膜破碎特征如图 4 和图 5 所示。从图 4 可以看出, 对喷嘴 1, 随着入射速度从 $2.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $6.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 液膜破碎模式依次呈现闭合边缘模式(M1)、开放边缘模式(M2)、无边缘模式(M3)、波或韧带模式(M4); 从图 5 可以看出, 随着入射速度从 $2.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $5.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 喷嘴 2 的液膜破碎模式依次呈现闭合边缘模式(M1)、开放边缘模式(M2)、无边缘模式(M3)。

此现象与文献[20]研究一致, 但是在细节方面有显著差异, 分析认为: 当 $u \leq 2.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 如图 4a 和图 5a 所示, 液膜破碎模式呈现闭合边缘模式, 两股流体自喷嘴喷出后撞击产生圆形的撞击液面, 液膜下游产生少量的不连续流体链和几滴大液滴。此时, 液膜表面稳定光滑, 但是液膜边缘向喷嘴直径小的一侧偏移, 而且随着喷嘴直径的增大偏移越显著, 这可能是因为大喷嘴具有较大的横截面积导致两流体撞击时边缘发生偏移, 此现象与等径撞击不同^[20]。当 $2.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq u \leq 3.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 如图 4b, 4c 和图 5b, 5c 所示, 液膜达到开放边缘模式, 由于黏度影响液膜仍然光滑, 但是边缘开始出现孔洞, 使得液膜边缘打开, 在边缘产生几滴较大的液滴,

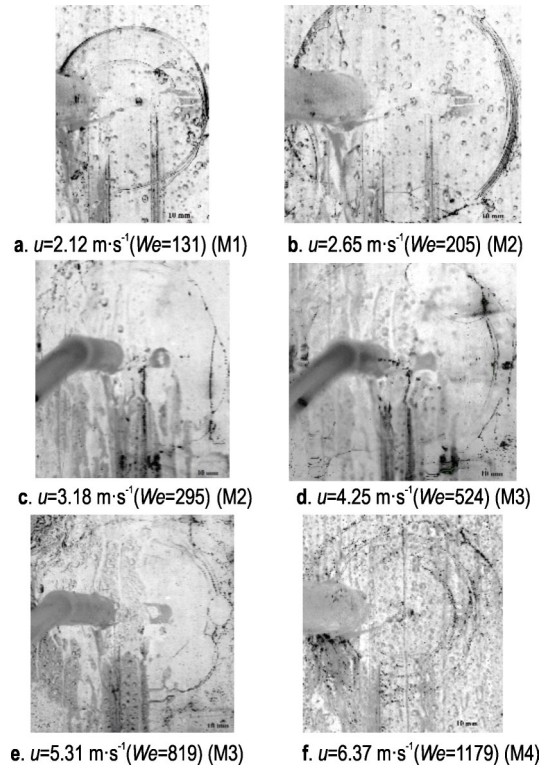


图 4 喷嘴 1 在不同入射速度(韦伯数)下 60G 撞击液膜破碎特征
Fig. 4 60G impinging liquid sheet breakup characteristics of nozzle 1 at different jet velocities u (We numbers)

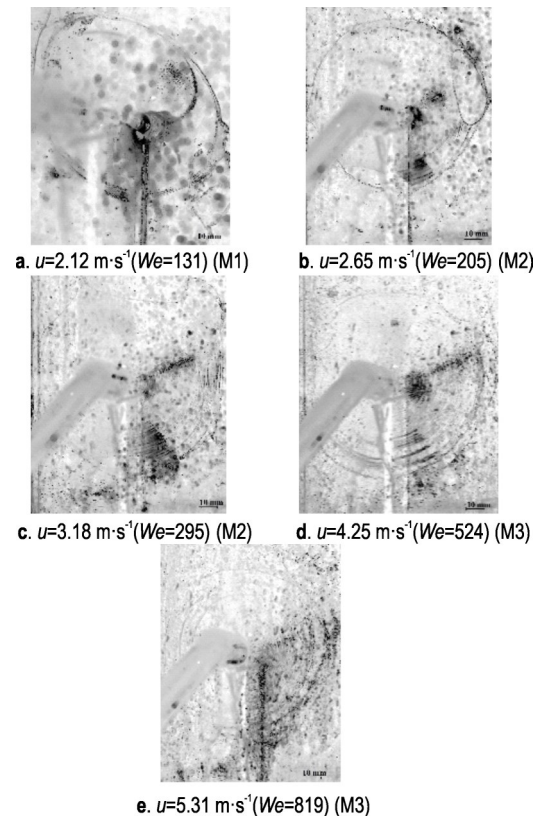


图 5 喷嘴 2 在不同入射速度(韦伯数)下 60G 撞击液膜破碎特征
Fig. 5 60G impinging liquid sheet breakup characteristics of nozzle 2 at different jet velocities u (We numbers)

而且随着喷嘴直径的增大液滴数量减小、直径增大;同时,液膜边缘偏移现象仍然存在,与文献[20]现象不一致,这可能是60G黏度较大导致。当 $4.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \leq u \leq 5.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,如图4d、4e和图5d、5e所示,液膜达到无边模式开始不稳定,边缘产生波纹,变得褶皱,同时液膜边缘消失,液滴数量显著增加,液滴尺寸显著减小,入射速度的增加促进了液膜的扰动,液膜破碎机制可解释为Kelvin-Helmholtz不稳定性^[22];同时,喷嘴直径对于液膜及液滴的影响减弱。随着入射速度增加到 $6.37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,如图4f所示,液膜达到波或韧带模式,液膜上的表面波从边缘延伸到撞击点,撞击点处开始出现孔洞,液膜变的更加不稳定导致液膜破碎,在边缘形成“弓形韧带”,液滴数量显著增加,液滴尺寸更均匀,此时较强的湍动程度促进了液膜的破碎。

2.2 60G 撞击破碎长度分析

不同韦伯数下液膜破碎长度变化规律如图6所示。从图6中可以看出,随着韦伯数增加,液膜破碎长度呈现先增大后减小的趋势,当 $We=401$ 时,破碎长度达到最大,此时液膜破碎模式由M2向M3过渡,液膜破碎程度增加,破碎机制发生变化。当 $51 \leq We \leq 401$ 时,两流体撞击后,由于撞击动量较小,主要用于液膜的扩展,从而使得液膜破碎长度增大;当 $We > 401$ 时,此时两流体撞击后的动量主要用于液膜的完全破碎以及液滴的破碎,从而使得破碎长度减小。当喷嘴直径由喷嘴1增大到喷嘴2时,液膜破碎长度呈现增大的趋势,这是因为喷嘴直径增大抑制液膜破碎,在相同入射速度下,较大直径喷嘴撞击后的动量首先用于液膜的扩展,从而使得破碎长度增加。

将图6中不同破碎模式、不同喷嘴直径、不同韦伯数下的液膜破碎长度 L_b/D 进行统计回归,得到不同破碎模式下液膜破碎长度与喷嘴直径、韦伯数的经验关联式。当处于M1、M2模式时,液膜破碎长度与喷嘴直

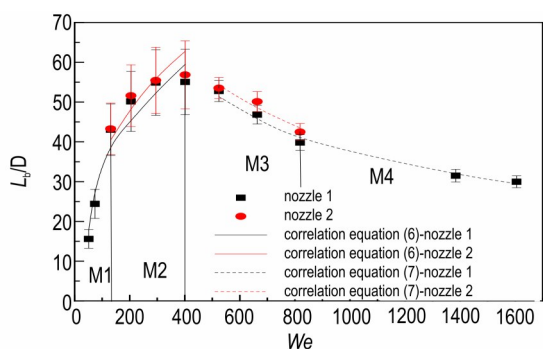


图6 不同韦伯数下60G撞击液膜破碎长度 L_b/D 变化规律
Fig.6 Trends of liquid sheet breakup length L_b/D of 60G impinging at different We numbers

径、韦伯数关联式如式(6)所示,相关系数 $R^2=0.9092$,相对误差在 $\pm 15\%$ 之内。

$$L_b/D = e^{1.48} We^{0.41} (D_2/D_1)^{0.59} \quad (6)$$

当处于M3、M4模式时,液膜破碎长度与喷嘴直径、韦伯数关联式如式(7)所示,相关系数 $R^2=0.9790$,相对误差在 $\pm 5\%$ 之内。

$$L_b/D = e^{6.91} We^{-0.50} (D_2/D_1)^{0.47} \quad (7)$$

将式(6~7)的曲线绘制在图6中,可以看出M1、M2模式下的经验关联式相关性较M3、M4模式下的相关性差,但是总体相关性均较好,经验关联式能够较好地揭示液膜破碎长度与喷嘴直径、韦伯数之间的关系。

2.3 60G 撞击液膜厚度分析

Taylor^[23]通过理论和实验揭示了液膜上任意一点的厚度 h 与半径 r 成反比,与射流速度无关,但是与入射角 θ 和方位角 Φ 有关,如式(8)所示。

$$h = \frac{K(\Phi, \theta)}{r} \quad (8)$$

Ranz^[24]采用质量守恒和动量守恒计算了液膜上任一点的厚度,如式(9)所示,但是当 $\varphi=180^\circ, \theta < 60^\circ$ 时,计算结果为负数。其中 R 为喷嘴半径。

$$\frac{hr}{R^2} = (1 + 2\cos\theta \cos\phi) \quad (9)$$

同时, $\theta=90^\circ$ 时对于液膜厚度的研究较少,因此本节仍然采用Image Pro-Plus软件,对拍摄的500组照片进行计算得到液膜厚度平均值,结果如图7所示。从图7中可以看出,随着韦伯数的增加,液膜厚度呈现减小的趋势,当 $We > 800$ 时逐渐趋于平缓。同时,随着喷嘴直径的增大,液膜厚度增加。以上研究现象与文献[20]研究结果一致,但是比水、40%甘油-水溶液、50%甘油-水溶液液膜厚度显著增大。

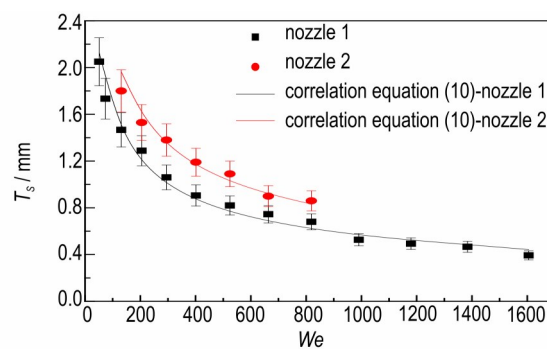


图7 不同韦伯数下60G撞击液膜厚度变化规律
Fig.7 Trends of liquid sheet thickness of 60G impinging at different We numbers

将图7中液膜厚度与喷嘴直径、韦伯数进行关联,得到关联式如式(10)所示,相关系数 $R^2=0.9736$,相关性较好,相对误差在 $\pm 10\%$,能够较好地揭示液膜厚度与喷嘴直径、韦伯数之间的关系。

$$T_s = e^{1.96} We^{-0.47} (D_2/D_1)^{2.48} \quad (10)$$

2.4 60G 撞击液滴直径分析

从图4和图5中可以看出,随着韦伯数的增大撞击后液滴显著增多,液滴尺寸减小。本节将定量讨论韦伯数、喷嘴直径对液滴直径及索特平均直径 $D[3,2]$ 的影响规律。 $D[3,2]$ 随韦伯数的变化图像如图8所示。从图8中可以看出,随着韦伯数的增大, $D[3,2]$ 呈现减小的趋势,最小值达到 $620 \mu\text{m}$ 左右。但是,随着喷嘴直径从喷嘴1增大到喷嘴2, $D[3,2]$ 呈现增大的趋势,当 $We=131$ 时,喷嘴2的 $D[3,2]$ 是喷嘴1的1.27倍;当 $We=819$ 时,喷嘴2的 $D[3,2]$ 是喷嘴1的1.15倍。研究表明,随着韦伯数的增大,喷嘴直径对液滴索特平均直径的影响减弱;在较大韦伯数下,较大的动量占主导作用,促进了液滴的破碎。

将图8中不同喷嘴直径、韦伯数下的液滴索特平均直径进行统计回归,得到液滴索特平均直径与喷嘴直径、韦伯数关联式如式(11)所示,相关系数 $R^2=0.9605$,相关性较好,相对误差在 $\pm 15\%$,能够较好地揭示液滴直径与喷嘴直径、韦伯数之间的关系。

$$D[3,2]/D = e^{2.75} We^{-0.60} (D_2/D_1)^{1.21} \quad (11)$$

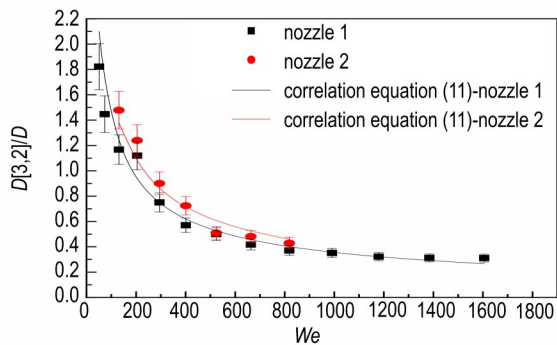


图8 不同韦伯数下60G撞击 $D[3,2]/D$ 的变化规律
Fig.8 Trends of $D[3,2]/D$ of 60G impinging under different We numbers

不同入射速度下, $y=-50 \text{ mm}/-60 \text{ mm}$ 平面上液滴平均直径分布如图9所示。从图9可以看出,液滴平均直径在流场中部最大,向两侧逐渐减小,并随着入射速度的增大,减小的趋势越来越缓慢。当 $u=2.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $3.18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,液滴直径沿 y 轴向下移动呈现增大的趋势;但是,当 $u \geq 5.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,液滴直径呈现减小

的趋势,但并不显著。这是因为,在较低的人射速度下,由于较小的动量不足以使液膜和液滴破裂,液滴在下游发生聚合,导致液滴平均直径沿 y 轴向下增大。但当入射速度足够大时,碰撞后的较高动量导致液滴二次破碎,小液滴在远离液膜处产生,导致液滴平均直径沿 y 轴向下减小。同时,随着喷嘴直径的增大,液滴平均直径呈现增大的趋势,此现象与图7研究结果一致。

不同入射速度下的液滴直径分布如图10所示,从图10中可以看出随着入射速度的增大,液滴直径频率的峰值向左移动,液滴直径减小,液滴直径分布变窄,液滴分布变均匀;当处于M1和M2模式,在两种喷嘴条件下,液滴直径分布较宽且不均匀,液滴直径频率峰值无法获得;当入射速度从 $4.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $5.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,喷嘴1液滴直径频率峰值从 $900 \mu\text{m}$ 减小到 $600 \mu\text{m}$,喷嘴2液滴直径频率峰值从 $1100 \mu\text{m}$ 减小到 $800 \mu\text{m}$,但液滴直径分布均较宽。从图10a还可看出,当 $u > 5.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,液膜破碎模式达到M4模式,喷嘴1小液滴集中在 $400 \sim 900 \mu\text{m}$,液滴分布变窄且均匀。但是,随着喷嘴直径的增大,液滴分布变宽,液滴直径频率峰值增大。例如当 $u=5.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,喷嘴直径由喷嘴1增大到喷嘴2,液滴直径频率峰值由 600 nm 增大到 800 nm 。研究表明,在较低入射速度下,喷嘴直径从喷嘴1增大到喷嘴2会抑制液滴的破碎,但随着入射速度的增加,较强的湍动对液滴的破碎作用更加显著。

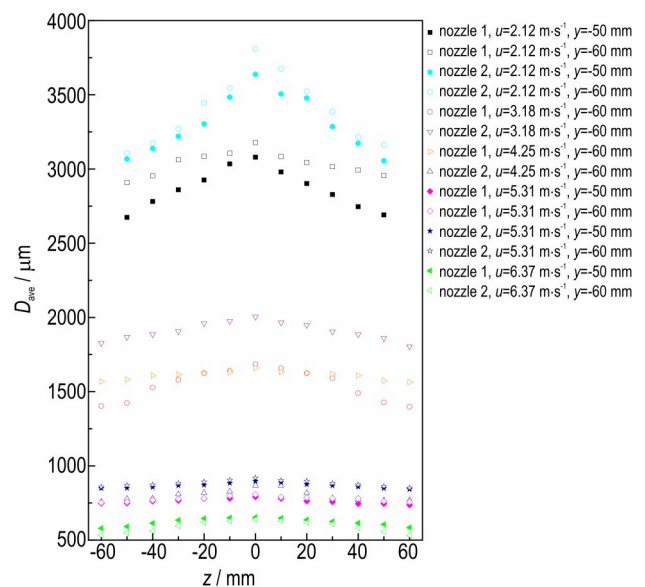
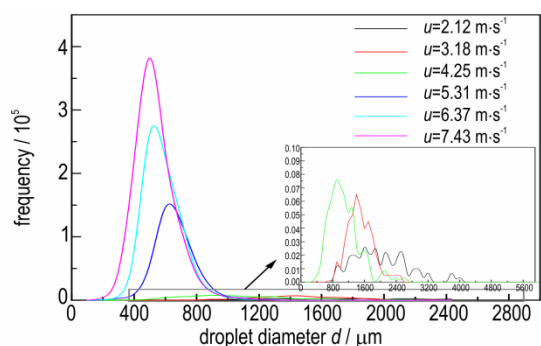
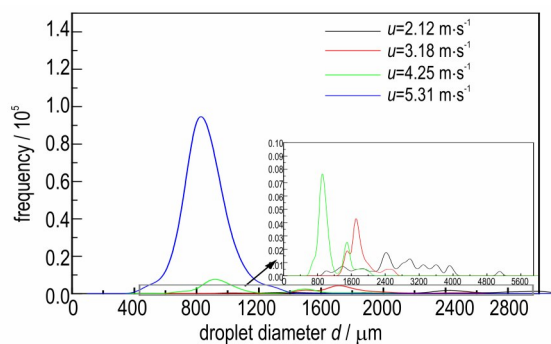


图9 $y=-50/-60 \text{ mm}$ 平面上不同入射速度下60G撞击液滴平均直径沿 z 轴分布

Fig.9 Average droplet diameter distributions of 60G impinging with different jet velocities u along z -axis at $y=-50/-60 \text{ mm}$



a. nozzle 1



b. nozzle 2

图10 不同入射速度下60G撞击喷嘴1和喷嘴2的液滴直径分布

Fig.10 Droplet size distributions of 60G impinging of nozzle 1 and 2 under different jet velocities

2.5 60G 撞击液滴速度分析

$y=-60\text{ mm}$ 时 y 方向上的轴向平均速度 v_y 和 z 方向上的径向平均速度 v_z 沿 z 轴的变化如图 11 所示。从图 11a 中可以看出, v_y 分布呈现“V”字形变化, 在中心处最大, 向边缘逐渐减小, 而 v_z 的变化趋势相反 (图 11b), 此现象与撞击流原理一致。随着入射速度的增大, 液滴的轴向和径向速度都增大, 液滴运动的湍动程度增加; 随着喷嘴直径的增大, 液滴的轴向和径向速度均呈现减小的趋势, 此时液滴较难破碎, 液滴直径较大, 需要更多的动量使得液膜和液滴破碎, 因此液滴速度减小, 与图 8 研究结果一致。研究表明, 在较低入射速度下, 喷嘴直径的增大会抑制液膜和液滴的破碎; 当到达无边缘模式, 液膜破碎机制发生改变, 此时较高入射速度下, 较高的动量能促进液膜和液滴的破碎。

3 复合含能材料粘结剂溶剂混合过程液滴直径分布的实验验证

液滴分布特征作为判断其雾化性能的重要标准之一, 对于复合含能材料颗粒的均匀性和直径分布十分重要, 关系到复合含能材料的稳定性 (如撞击感度、摩

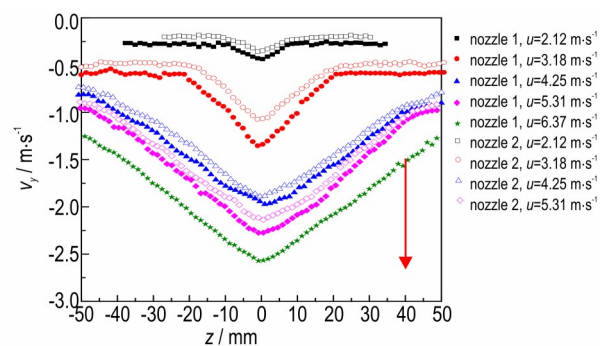
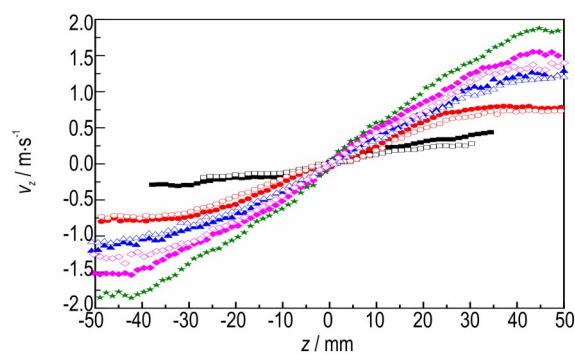
a. average axial velocity component v_y b. average radial velocity component v_z

图11 $y=-60\text{ mm}$ 平面上不同入射速度下60G撞击液滴平均速度沿 z 轴分布

Fig.11 Droplet average velocity distributions of 60G impinging with different jet velocities along z -axis at $y=-60\text{ mm}$

擦感度等)^[25]。从以上研究中可以看出, 当入射速度越小或喷嘴直径越小, 液膜的破碎长度越小, 撞击后液滴越容易破碎、直径越小、数量越多、分布越均匀、雾化效果越好。为对比验证所得结果, 采用如表 1 所示的操作参数对二乙二醇与水的混合过程中液滴直径分布进行实验研究。

如图 2 所示, 二乙二醇从喷嘴 D_1 射入, 水从喷嘴 D_2 射入, 在不等径开放式撞击流反应器中等动量撞击混合, 同时用 CCD 相机拍摄 500 组图片, 采用 Image-pro Plus 对不同入射速度下的图片进行液滴直径计算, 采用式(5)计算液滴索特平均直径 $D[3,2]$, 最终进行统计分析得到液滴分布特征, 结果如图 12 所示。从图 12 中可以看出, 随着入射速度的增大, 液滴直径减小, 分布变窄, 这与图 10 研究结果一致。在 $We=1517$ 、喷嘴 1 的条件下, 液滴直径最小, 达到 $512\text{ }\mu\text{m}$ 。

采用式(11)计算二乙二醇-水体系的液滴直径, 实验结果与计算结果如图 13 所示, 发现两者较为一致, 误差在 $\pm 15\%$ 以内, 表明 60G 撞击体系中液滴直径与各外控参量的关联式可以扩展到用于预测复合含能材料粘结剂溶剂二乙二醇-水混合过程中液滴分布行为。

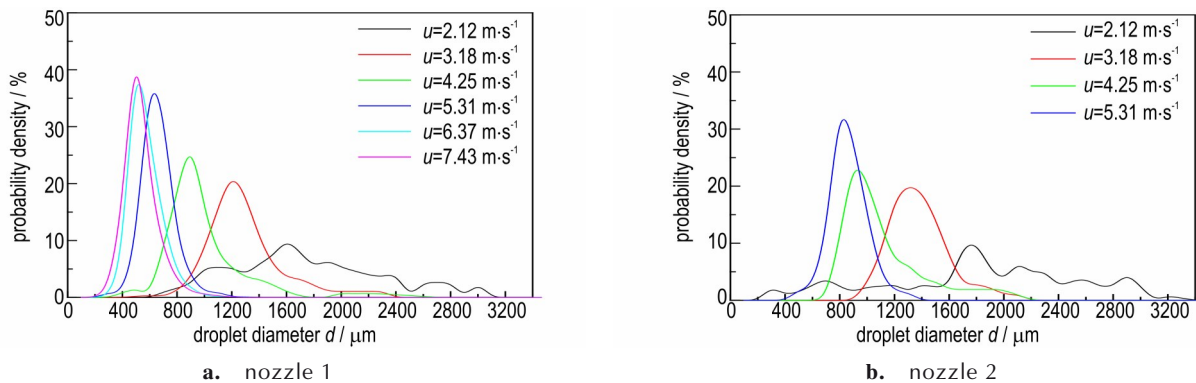


图 12 不同入射速度下乙二醇与水撞击液滴直径分布

Fig.12 Droplet diameter distributions of diethylene glycol-water impinging at different jet velocities

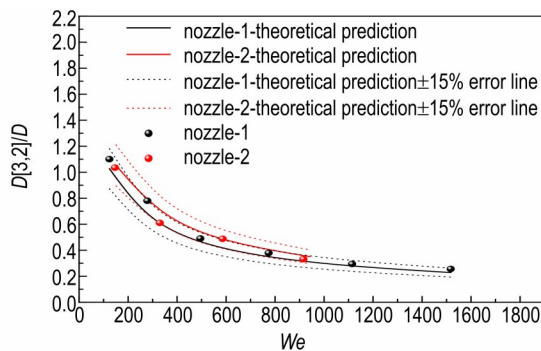


图 13 不同韦伯数下乙二醇与水撞击液滴直径实验值与计算值对比

Fig.13 Comparison of experimental values and theoretical predictions of droplet diameters of diethylene glycol-water impinging at different We numbers

研究为不等径开放式撞击流制备复合含能材料的结构优化提供参考,可拓展复合含能材料的制备方法以及开放式撞击流反应器的应用领域。

4 结论

(1)以 60G 为工作介质、采用 PIV 技术及 Image Pro-Plus 软件研究了不等径开放式撞击流反应器的液膜破碎特征。结果发现随入射速度的增大,液膜破碎长度先增大后减小,液膜厚度减小;喷嘴直径的增大对同一入射速度下液膜破碎模式的影响不显著,而液膜破碎长度和厚度均增大。

(2)以 60G 为工作介质研究了不等径开放式撞击流反应器的液滴行为。结果表明随韦伯数增大,液滴直径减小,液滴直径分布变窄,液滴速度增大, $D[3,2]$ 最小值达到 $620 \mu\text{m}$;而随着喷嘴直径增大,液滴直径增大,速度减小,分布变宽。

(3)获得了 60G 液膜破碎长度、液膜厚度、 $D[3,2]$ 与喷嘴直径、韦伯数间的经验关联式,并验证了不等径

开放式撞击流反应器中复合含能材料粘结剂溶剂乙二醇与水混合过程的液滴分布。结果表明随入射速度增大,乙二醇与水撞击混合后液滴直径减小,分布变窄, $D[3,2]$ 数值在关联式 $\pm 15\%$ 误差范围内与理论预测结果一致,为不等径开放式撞击流反应器制备复合含能材料的结构优化提供指导。

参考文献:

- [1] TAMIR A 著,伍沅译. 撞击流反应器:原理和应用[M]. 北京:北京化学工业出版社,1995.
TAMIR A, WU Yuan. Impinging stream reactor: principle and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1995.
- [2] 张建伟,闫宇航,沙新力,等. 撞击流强化混合特性及用于制备超细粉体研究进展[J]. 化工进展,2020,39(3): 824-833.
ZHANG Jian-wei, YAN Yu-hang, SHA Xin-li, et al. Advances on impinging stream intensification mixing mechanism for preparing ultrafine powders[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(3): 824-833.
- [3] LV J, HU C, BAI M, et al. Experimental investigation of free single jet impingement using SiO_2 -water nanofluid[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 84: 39-46.
- [4] 张小宁,王卫民,徐更光. 高速撞击流技术制备炸药超细微粉的研究[J]. 火炸药学报,1999,22(3): 1-4.
ZHANG Xiao-ning, WANG Wei-min, XU Geng-guang. Study on the preparation of ultrafine particle of explosive using the technology of high-speed impinging streams[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 1999, 22(3): 1-4.
- [5] HUANG J C P. The breakup of axisymmetric liquid sheets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, 43(3): 305-319.
- [6] DOMBROWSKI N, FRASER R P. A photographic investigation into the disintegration of liquid sheets [J]. *A Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 1954, 247(924): 101-130.
- [7] LI R, ASHGRIZ N. Characteristics of liquid sheets formed by two impinging jets[J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(8): 087104.
- [8] JUNG S, HOATH S D, MARTIN G D, et al. Atomization patterns produced by the oblique collision of two Newtonian liquid jets[J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22(4): 042101.
- [9] ERNI P, ELABBADI A. Free impinging jet microreactors: controlling reactive flows via surface tension and fluid viscoelasticity[J]. *Langmuir*, 2013, 29(25): 7812-7824.

- [10] LAI W H, HUANG T H, JIANG T L. Effects of fluid properties on the characteristics of impinging-jet sprays [J]. *Atomization Spray*, 2005, 15(4): 457-468.
- [11] XIA Y, KHEZZAR L, ALSHEHHI M, et al. Atomization of impinging opposed water jets interacting with an air jet [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 93: 11-22.
- [12] 张小宁, 徐更光, 王廷增. 高速撞击流粉碎制备超细 HMX 和 RDX 的研究 [J]. 北京理工大学学报, 1999, 19(5): 120-124. ZHANG Xiao-ning, XU Geng-guang, WANG Ting-zeng. Preparation of ultra-fine explosive HMX and RDX using high-speed impinging streams [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1999, 19(5): 120-124.
- [13] 张小宁, 徐更光, 何得昌, 等. 纳米级奥克托今超微颗粒制备技术研究 [J]. 兵工学报, 2002, 23(4): 472-475. ZHANG Xiao-ning, XU Geng-guang, HE De-chang, et al. A study on the preparation technology of nanometer ultra-fine HMX particle [J]. *Acta Armamentarii*, 2002, 23(4): 472-475.
- [14] 陈潜, 何得昌, 徐更光等. 高速撞击流法制备超细 HMX 炸药 [J]. 火炸药学报, 2004, 27(2): 23-25. CHEN Qian, HE De-chang, XU Geng-guang, et al. Preparation of ultrafine particle of HMX explosive using the technology of high-speeding impinging streams [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2004, 27(2): 23-25.
- [15] 王杰超. 窄粒度分布含能复合微球的膜乳化辅助制备及性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2021. WANG Jie-chao. Preparation and performance study of membrane emulsification-assisted preparation of energetic composite microspheres with narrow particle size [D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [16] ALVISO C T, PEKALA R W. Melamine-formaldehyde aerogels [J]. *Polym Prepr*, 1991, 32: 242.
- [17] 梁鹏飞, 张阿芳, 刘跃军, 等. 一种三喷嘴撞击流快速混合装置: CN202111215945.1 [P], 2021. 2022-01-04. LIANG Peng-fei, ZHANG A-fang, LIU Yue-jun, et al. A triple-impinging jets rapid mixing device: CN202111215945.1 [P], 2021. 2022-01-04.
- [18] KAMPEN J, CIEZKI H, TIEDT T, et al. Some aspects of the atomization behavior of Newtonian and of shear-thinning gelled non-Newtonian fluids with an impinging jet injector [C]//42nd AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibition, Sacramento, CA, USA, 2006: 1-13.
- [19] MA D, CHEN X, KHARE P, et al. Atomization patterns and breakup characteristics of liquid sheets formed by two impinging jets [C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, FL, USA, 2011: 97.
- [20] ZHANG J, LIANG P, LUO Y, et al. Liquid sheet breakup mode and droplet size of free opposed impinging jets by particle image velocimetry [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 29: 11296-11307.
- [21] ZHANG J, LIANG P, LIU Y. Impingement and breakup characteristics of free opposed impinging jets with unequal nozzle diameter [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, 145: 110884.
- [22] BAI F Q, DIAO H, ZHANG M Z, et al. Breakup characteristics of power-law liquid sheets formed by two impinging jets [J]. *Fluid Dynamics Research*, 2014, 46: 055506.
- [23] TAYLOR G. Formation of thin flat sheets of water [C]//Proceedings of the Royal Society of London, 1960, 259: 1-17.
- [24] RANZ W E. Some experiments on the dynamics of liquid films [J]. *Journal of Applied Physics*, 1959, 12: 1950-1955.
- [25] 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试验 [J]. 内燃机学报, 2013, 31(6): 519-524. YI Ji-ming, BAI Fu-qiang, CHANG Qing, et al. Experiment on velocity and size distribution of droplets produced by an impinging liquid jet [J]. *Transactions of CSICE*, 2013, 31(6): 519-524.

Atomization Characteristics of Free Impinging Jets with Unequal Nozzle Diameter and Mixing of Diethylene Glycol-water Solution

LIANG Peng-fei, CHEN Jin-fang, ZHAO Mei-ling, ZHANG Guo-hui, WANG Ya-li

(Shanxi North Xing'an Chemical Industry Co. Ltd., Taiyuan 030008, China)

Abstract: Atomization performance of free impinging jets with unequal nozzle diameter of 60% Glycerol-water (60G) solution was investigated using PIV technique. The liquid sheet breakup characteristics and droplet behaviors were studied under different Weber numbers ($51 \leq We \leq 1605$), jet velocities ($2.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq u \leq 6.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and nozzle diameters (nozzle 1: left nozzle diameter (D_1)=1.5 mm, right nozzle diameter (D_2)=2 mm; nozzle 2: D_1 =2 mm, D_2 =3 mm). The droplet distribution of the composite energetic material binder solvent diethylene glycol-water solution was also investigated. The results show that, as We number increases, liquid sheet breakup length increases first and then decreases from edge-free mode (M3) beginning, the liquid sheet thickness and droplet diameter decrease while the droplet velocity increases. Nevertheless, as the nozzle diameter increases, changes in liquid sheet breakup mode are insignificant, and the liquid sheet breakup length, thickness and droplet diameter all increase, while the droplet velocity decreases. At the same time, the empirical correlation equations are obtained between liquid sheet breakup length, liquid sheet thickness, Sauter mean diameter $D[3, 2]$ and nozzle diameter, We number. After validation using the diethylene glycol-water solution, it reveals that with the increase of jet velocity, the droplet diameter decreases and the distribution becomes narrow after the impinging of diethylene glycol-water solution. The error range of $D[3, 2]$ values is within $\pm 15\%$ of the empirical correlation equation, which is consistent with the theoretical prediction results.

Key words: free impinging jets; unequal nozzle diameter; binder solvent; liquid sheet breakup characteristics; droplet behaviors

CLC number: TJ55; TQ027

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023078

(责编: 卢学敏)