

幂律流体撞击射流破碎机理的实验

李建军, 夏振炎, 田 砚
(天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘 要: 通过自行研制的撞击射流系统, 采用高速摄像技术, 对 4 种不同卡波姆质量分数剪切变稀的卡波姆凝胶非牛顿幂律流体在不同射流条件下撞击液膜的破碎模式、喷雾锥角、破碎长度进行实验与分析. 结果表明: 不同流变特性的幂律流体出现的破碎模式不同, 黏度越高, 破碎模式越复杂; 4 种卡波姆凝胶在韦伯数为 8000 左右时, 达到完全发展模式, 并在韦伯数为 8000 左右时表现出相似的破碎特性; 随着韦伯数的增大, 喷雾锥角逐渐增大并趋于稳定, 稳定值小于撞击角度, 当卡波姆质量分数增大时, 最大喷雾锥角逐渐减小, 最终收敛于 60° ; 随着韦伯数的增大, 4 种卡波姆凝胶的破碎长度先小幅变大然后减小, 理论结果与实验结果整体趋势相似.

关 键 词: 破碎机理; 幂律流体; 撞击射流; 破碎模式; 喷雾锥角; 破碎长度

中图分类号: V439; O359⁺1

文献标志码: A

Experiment on breakup mechanism of impinging jet of power-law liquid

LI Jian-jun, XIA Zhen-yan, TIAN Yan

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: High-speed photography technology was used to investigate four kinds of shear-thinning Carbopol gel non-Newtonian power-law fluids with different Carbopol mass fractions by self-developed impinging jet system, the breakup pattern, spray cone angle and breakup length of liquid sheet of impinging jet were experimented and analyzed under different jet conditions. Results show that power-law fluids with different rheological properties have different breakup pattern, the higher viscosity means the more complex breakup pattern, when Weber number is about 8000, four kinds of Carbopol gel achieve to fully developed pattern, and show the similar breakup pattern; as Weber number increases, the spray cone angle increases gradually and tends to be a stable value less than the impinging angle. with increasing of the Carbopol mass fraction, the biggest spray cone angle decreases, eventually converging to 60° , the breakup length slightly increases first and then decreases of four kinds of Carbopol gel, but the theoretical results agree well with the experimental results in trend.

Key words: breakup mechanism; power-law liquid; impinging jet;
breakup pattern; spray cone angle; breakup length

凝胶推进剂由于综合固体和液体推进剂的优点, 如高热值、高安全性、便于储存和推力可调等, 因此在航天推进器的应用中有很理想的前景. 凝

胶推进剂是一种非牛顿幂律流体(下文简称幂律流体), 其流变特性比较特殊, 同时还具有高黏性, 这都使得凝胶推进剂的雾化非常困难, 也限制了

收稿日期: 2014-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(11172205, 11372219)

作者简介: 李建军(1988—), 男, 山东昌邑人, 硕士生, 主要从事多相流实验与数值模拟方面的研究.

通讯作者: 夏振炎(1969—), 男, 河北辛集人, 副教授, 博士, 主要从事实验流体力学、湍流及流动稳定性等方面的研究.

E-mail: xia_zhy@hotmail.com

凝胶推进技术的实际应用. 虽然已有学者对幂律流体撞击射流液膜破碎做了大量的尝试, 但随着推进技术性能要求的提高, 对凝胶推进剂的雾化机理仍需要更深入地研究.

1833年 Savart^[1] 首先发现撞击射流形成液膜的现象. Heidmann 等^[2], Dombrowski 等^[3-4] 通过对水撞击射流液膜破碎的实验研究发现, 射流的流动状态, 如层流或湍流, 会对液膜的发展破碎造成重要影响, 并且发现表面的波状扰动是导致液膜发展破碎的重要原因. Lai 等^[5] 通过水的对称撞击射流液膜图像分析得到了液膜空间尺度的变化规律. 发现液膜的最大长度和最大宽度随着射流速度的增加, 以速度的二次函数的形式增大; 在撞击夹角一定时, 液膜的最大长度和最大宽度的比值是定值, 与射流速度无关. Huang 等^[6] 通过实验和分析得出液膜的无量纲破碎长度随韦伯数 We 变化的关系, 当 $100 < We < 500$ 时, 无量纲破碎长度随 We 的增大而增大; 当 $We > 2000$ 时, 无量纲破碎长度随 We 的增加而减小. $500 < We < 2000$ 为过渡阶段, 并且 $800 < We < 1000$ 时无量纲破碎长度最大. 伊吉明等^[7] 利用三维相位多普勒技术对撞击水射流在不同条件下破碎模式及破碎速度场、粒度分布规律做了联合测量.

对于幂律流体方面, Chojnacki 等^[8-9] 通过实验分析了撞击射流液膜形成特性. Von Kampen^[10] 对牛顿流体与幂律流体撞击射流液膜的破碎模式做了详细的对比和总结, 发现幂律流体黏度越高, 液膜越难以破碎. Yang 等^[11] 通过对幂律流体液膜的色散关系分析, 修正参数, 推导出破碎长度和不稳定波长的计算公式, 并与实验数据做了对比, 取得较好的一致性. Jayaprakash 等^[12] 研究了一种由煤油和铝粒子组成的幂律流体的雾化特性, 发现在射流撞击夹角为 50° 和 60° 时, 随喷射压力增加, 破碎长度明显减小. Baek 等^[13] 对水、幂律流体和掺入纳米微粒的幂律流体的破碎模式、破碎长度等破碎特征做了对比研究, 结果表明三者的雾化特性明显不同, 特别是在低速状态下, 掺入纳米微粒的幂律流体由于纳米微粒的掺入增加了撞击动能, 使其破碎长度比纯幂律流体小一些.

为了更深入地了解不同凝胶撞击射流液膜破碎机理, 本文采用高速摄像技术对 4 种幂律流体 (卡波姆质量分数不同的卡波姆凝胶) 撞击射流进行了对比实验, 针对不同射流条件下液膜的破碎模式、喷雾锥角、破碎长度等开展实验测量与分

析, 以获得对凝胶撞击射流液膜破碎机理更深入的理解, 提高凝胶推进剂撞击射流喷雾的燃烧效率, 进而提供对推进技术应用的指导.

1 实验系统

实验装置如图 1 所示, 主要由撞击射流雾化系统、光学图像采集系统、脉冲控制系统三部分构成. 撞击射流雾化系统是利用高压氮气瓶提供稳定的压力, 经过减压稳压器, 推动高压储液罐内的液体经管路从喷嘴喷出形成射流, 最后产生的废液由废液收集装置回收处理. 高压储液罐的压力由压力传感器实时采集, 压力传感器的精度为 0.3% . 脉冲控制系统可以精确控制喷射脉宽, 在射流出口速度标定时, 通过精确的定量计算得到射流出口速度与压力的关系.

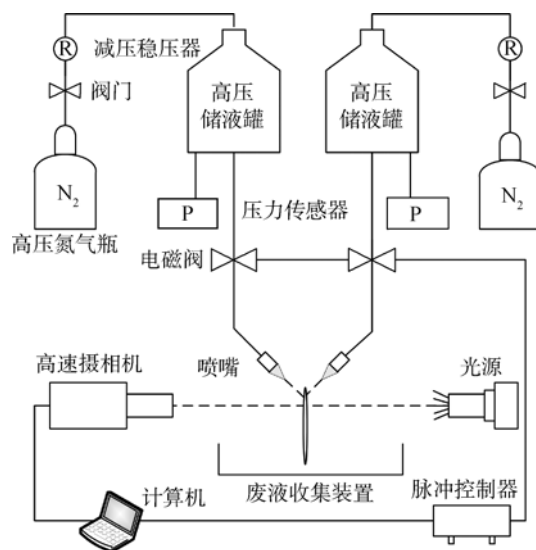


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

图 2 为喷嘴与撞击射流液膜的结构示意图^[14], 喷嘴的出口直径 d 为 0.6 mm , 长度 L 为 10.3 mm , 射流撞击夹角 2θ 为 90° , 预撞击长度 (喷嘴出口到撞击点的距离) L_j 为 10 mm .

采用日本 Photron 公司的 SA1.1 型高速摄像机拍摄撞击射流图像, 其最高拍摄频率为 675 kHz , 最小快门值为 370 ns . 实验中设定的拍摄频率为 5400 幅/s , 图像分辨率为 100 万像素 , 快门值设定为 $1/75000\text{ s}$, 光源最大功率为 165 W .

实验采用的凝胶模拟液是卡波姆质量分数 (ω_c) 分别为 0.15% , 0.25% , 0.35% 和 0.50% 的卡波姆凝胶, 其密度、表面张力和黏度等与实际应用的凝胶推进剂基本相当, 可以很好地模拟凝胶

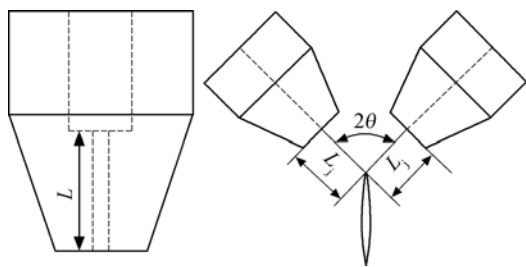


图2 喷嘴与撞击射流液膜的结构

Fig. 2 Configuration of nozzle and liquid sheet of impinging jet

推进剂的雾化性能和流变特性。

图3是在温度为25℃时,4种卡波姆凝胶的流变特性实验测量结果。如图所示,随着剪切速率的增大,黏度 η 明显减小,而且在相同的剪切速率下,卡波姆凝胶的黏度随 w_c 增大而变高。

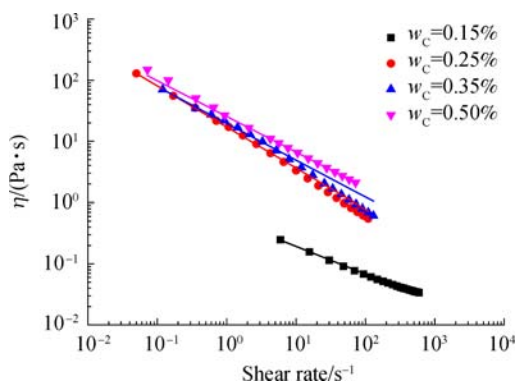


图3 4种卡波姆凝胶的流变特性曲线

Fig. 3 Rheological properties curves of four kinds of Carbopol gel

实验中所用的卡波姆凝胶属于剪切变稀的假塑性流体,其流变特性可以用幂律模型来表示。

$$\eta = K\dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (1)$$

式中 K 为稠度系数,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; n 为幂律指数。表1是根据流变特性曲线,由幂律模型得到的4种卡波姆凝胶的流变参数。实验所用到的4种卡波姆凝胶的密度均为 1000 kg/m^3 ,表面张力为 0.072 N/m 。

表1 4种卡波姆凝胶的流变参数

Table 1 Rheological parameters of four kinds of Carbopol gel

w_c	K	n
0.15%	0.551	0.546
0.25%	17.164	0.327
0.35%	19.612	0.398
0.50%	25.543	0.415

广义雷诺数 Re_{gen} 采用 Metzner 等^[15-16]提出的表达形式

$$Re_{\text{gen}} = (\rho U_{\text{jet}}^{2-n} d^n) / [K(0.75 + 0.25/n)^{n-1}] \quad (2)$$

式中 ρ 为幂律流体的密度; U_{jet} 为喷嘴出口处的射流速度。

韦伯数表示为

$$We = (\rho U_{\text{jet}}^2 d) / \sigma \quad (3)$$

式中 σ 为幂律流体的表面张力。

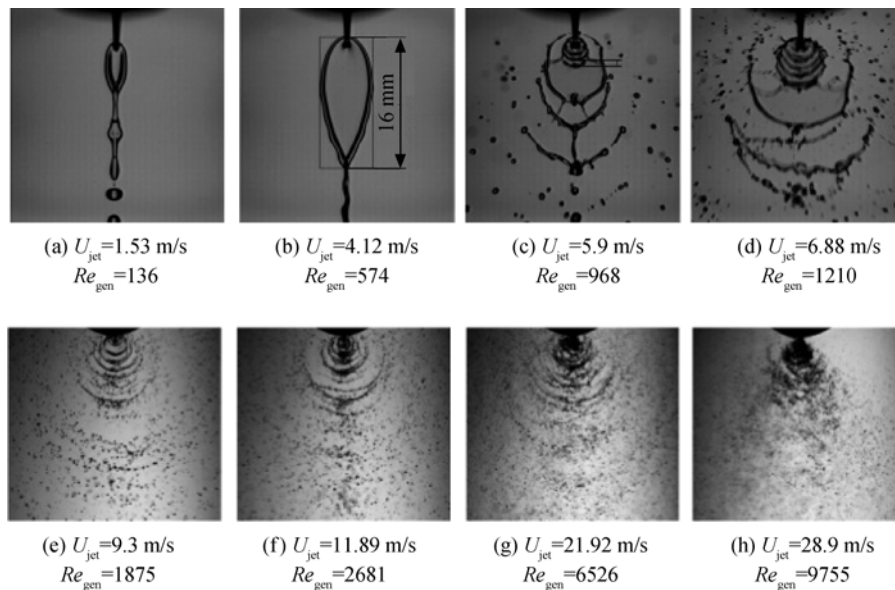
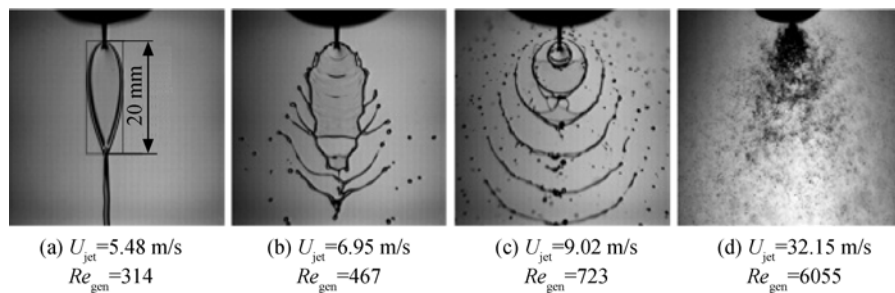
2 实验结果及分析

2.1 破碎模式及分布

2.1.1 破碎模式

图4是 $w_c = 0.15\%$ 的卡波姆凝胶在不同射流速度 U_{jet} 下的破碎铺展图像,随着射流速度和广义雷诺数的不断增加,撞击射流液膜经历了从发展、破碎,到最后雾化的3种不同破碎模式。在较低雷诺数下,两束射流在撞击点处形成垂直于两束射流平面的液膜,然后向下游继续发展形成了相垂直的新液膜,呈现出一种链状结构,如图4(a)。随着广义雷诺数的增大,这种链状结构逐渐消失,只出现在撞击点处形成的液膜,如图4(b)。图4(a)~图4(b)广义雷诺数下的液膜均具有明显的边界,这种破碎模式属于“封闭边界模式”。随着射流速度的不断增加,液膜的表面开始出现有规律的表面波,并在液膜的下游开始出现弓形液线,这种弓形液线不断向下游方向扩展、衰减,最后断裂、破碎成液滴。随着速度的不断增加,弓形液线破碎时间提前并且程度加剧,在下游形成了更多的液滴。这种伴随有弓形液线出现、发展的破碎模式,属于“弓形液线模式”,如图4(c)~图4(g)。在足够大的速度及广义雷诺数下,从撞击点处就开始出现大量破碎液滴,而且雾场中心浓密度最大,下游及两侧递减,这种模式属于“完全发展模式”,如图4(h)。

图5是 $w_c = 0.25\%$ 的卡波姆凝胶撞击射流形成液膜的破碎图像。图像显示,该幂律流体出现了4种破碎模式,其中封闭边界模式(closed rim pattern)(图5(a)),弓形液线模式(ligament structures)(图5(c)),完全发展模式(fully developed pattern)(图5(d)),3种破碎模式与 $w_c = 0.15\%$ 的卡波姆凝胶撞击射流液膜破碎模式相同。在介于封闭边界模式、弓形液线模式的速度及 Re_{gen} 之间出现了另一种模式(图5(b))。在这种模

图 4 $\omega_c = 0.15\%$ 的卡波姆凝胶撞击射流液膜破碎图像Fig. 4 Liquid sheet breakup images of impinging jet by Carbopol gel of $\omega_c = 0.15\%$ 图 5 $\omega_c = 0.25\%$ 的卡波姆凝胶撞击射流液膜破碎图像Fig. 5 Liquid sheet breakup images of impinging jet by Carbopol gel of $\omega_c = 0.25\%$

式下,仍然有液膜的整体轮廓,在液膜的上游边界处开始有液线产生,并从液膜撕裂下来,在往下游发展的过程中,这种液线逐渐衰减破碎成液滴,并在液膜的两边形成成串的液滴,这种模式属于开边界模式(open rim pattern),如图 5(b)。

图 6 为 $\omega_c = 0.35\%$ 和 0.50% 的卡波姆凝胶射流撞击形成的液膜破碎图像。这两种幂律流体出现了 5 种破碎模式,其中的 4 种与 $\omega_c = 0.25\%$ 的卡波姆凝胶的 4 种破碎模式相同,图 6(a)、图 6(f)为封闭边界模式,图 6(b)、图 6(g)为开边界模式,图 6(d)、图 6(i)为弓形液线模式,图 6(e)、图 6(j)为完全发展模式。在这 4 种破碎模式中, $\omega_c = 0.50\%$ 的卡波姆凝胶出现的开边界模式与前面几种质量分数的略有不同,在边界处出现了杂乱无章的液线,难以形成液滴。图 6(d)、图 6(i)所示的弓形液线模式与前面两种 ω_c 的卡波姆凝胶相比弓形液线形成处离撞击点的距离更

远,而且液膜的宽度也有所增加。4 种 ω_c 的卡波姆凝胶表面张力和密度的变化很小,随着 ω_c 的提高,卡波姆凝胶的黏度不断增大。黏度的增大使卡波姆凝胶撞击射流液膜更难以破碎,出现的破碎模式也越来越复杂。正是因为黏度的增大,在达到开边界模式与弓形液线模式之间的射流速度 U_{jet} 及广义雷诺数 Re_{gen} 下,出现了一种新的破碎模式,如图 6(c)、图 6(h)。此时的液膜周围轮廓彻底破碎,液线从液膜下方周期性的剥落,并向下游衰减,最后破碎成大量液滴,这种模式属于无边界模式。

2.1.2 破碎模式分布图

图 7 给出了 4 种卡波姆凝胶在不同韦伯数和广义雷诺数下,不同的破碎模式分布图。对于图 7 中的数据点,不同形状的符号代表不同的卡波姆凝胶,不同的颜色代表不同的破碎模式。从图中各曲线中破碎模式的分布看,封闭边界模式在最低

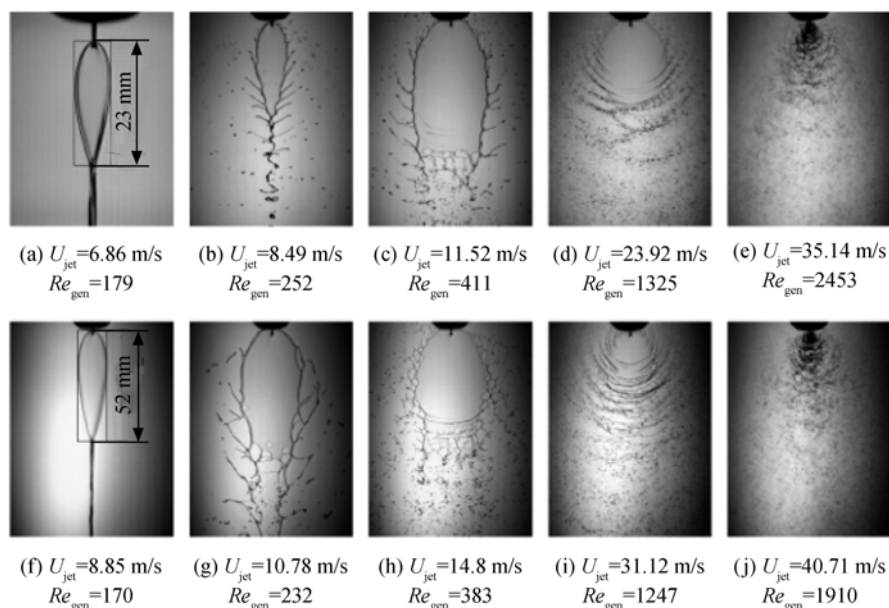


图6 $\omega_c = 0.35\%$ (图6(a)~图6(e))和 0.50% (图6(f)~图6(j))

的卡波姆凝胶撞击射流液膜破碎图像

Fig. 6 Liquid sheet breakup images of impinging jet by Carbopol gel of $\omega_c = 0.35\%$

(Fig. 6(a)~Fig. 6(e)) and 0.50% (Fig. 6(f)~Fig. 6(j))

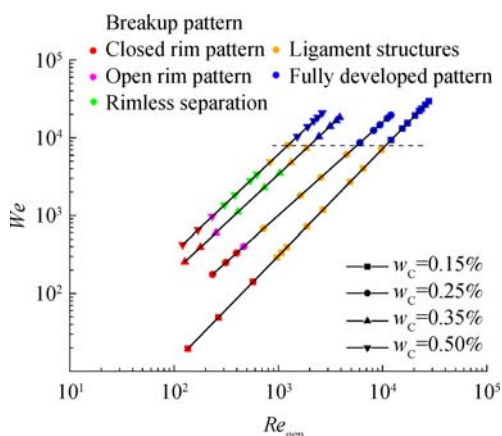


图7 4种卡波姆凝胶破碎模式图

Fig. 7 Breakup pattern diagram for four kinds of Carbopol gel

的 We 和广义雷诺数 Re_{gen} 范围内. 随着 We 和 Re_{gen} 的增大, 依次出现开边界模式, 无边界模式, 弓形液线模式, 完全发展模式. 图中的虚线表示 4 种卡波姆凝胶完全发展模式与其他模式的分界线, 是 We 为 8000 左右的一条直线. 因为实验中 4 种卡波姆凝胶的表面张力接近, 当出现完全发展模式时, 剪切速率已经达到相当大的程度, 此时的卡波姆凝胶的黏度已经达到了最小极限黏度. 4 种卡波姆凝胶虽然黏性表现相差比较大, 但是由于 ω_c 相差不大, 最小极限黏度几乎是一样的, 而且表面张力几乎相同, 因此完全发展模式几乎是在同一 We 下出现, 并且表现的破碎特性也比较

相似.

从图 7 中还可得出, $\omega_c = 0.15\%, 0.25\%, 0.35\%, 0.50\%$ 的卡波姆凝胶的曲线从下到上依次出现.

2.2 喷雾锥角

喷雾锥角能够刻画喷雾空间的发散程度, 是分析雾化效果非常重要的参数之一. 在撞击射流雾化实验中, 表征撞击射流液膜空间发散程度的两个重要参数, 分别是撞击射流液膜所在平面的扩展角和垂直撞击射流液膜平面的喷雾锥角. 其中对撞击射流液膜所在平面的扩展角的研究较多, Lee^[17] 分析了射流撞击夹角、射流速度和黏度对液膜所在平面扩展角的影响, 得到如下结论: 扩展角随射流撞击夹角的增大而增大; 当黏度较小时, 扩展角随射流速度增大而减小; 当黏度较大时, 扩展角随射流速度增大而增大. 本实验研究的是喷雾锥角 α 的变化, 由锥形喷雾场两侧, 两条比较清晰的边界的夹角表示, 如图 8 所示.

图 9 给出不同 ω_c 的卡波姆凝胶的喷雾锥角随 We 的变化曲线. 从图中可以看出, 随着 We 的不断增大, 喷雾锥角也在不断增加, 并在 We 增加到一定程度时, 趋于稳定. 这主要是由于 We 数的增加, 射流动量不断增加, 使两束射流掺混和动量交换逐渐增强, 喷雾的横向发展越来越剧烈, 使得喷雾锥角逐渐增大; 当 We 数增大到一定程度的

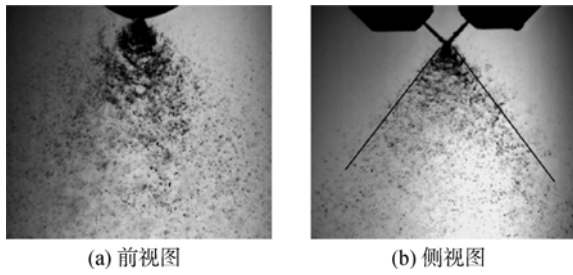


图 8 $w_c = 0.15\%$ 的卡波姆凝胶在 $U_{jet} = 28.9 \text{ m/s}$ 和 $Re_{gen} = 9755$ 时的液膜破碎图像

Fig. 8 Liquid sheet breakup images of Carbopol gel of $w_c = 0.15\%$ at $U_{jet} = 28.9 \text{ m/s}$ and $Re_{gen} = 9755$

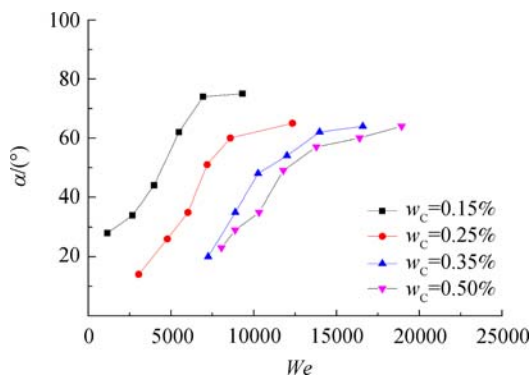


图 9 4 种不同 w_c 卡波姆凝胶的喷雾锥角随 We 的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of spray cone angle with Weber number of four kinds of Carbopol gel with different w_c

时候,雾场空间发散程度达到最大.从图中的 4 条曲线分布可以看出, $w_c = 0.15\%$ 的卡波姆凝胶最先出现并达到最大喷雾锥角,最大喷雾锥角为 76° .随着 w_c 的不断增大,每条曲线的最大喷雾锥角逐渐减小,减小的幅度也在变小,逐渐收敛于 60° .这主要是由于 w_c 高的卡波姆凝胶,在相同剪切速率下的黏度较大,高黏度抑制了雾化.从上述破碎模式实验结 w_c 越大的卡波姆凝胶,液膜破碎需要的射流速度越大,对应的 We 数也越大.

2.3 破碎长度

破碎长度一直以来都是喷雾研究的重要参数,本实验对液膜破碎长度定义是:在液膜对称轴线上,从两束射流撞击点开始到完整液膜边缘的长度.如图 10 所示.破碎长度的测量是对高速摄像机拍摄的连续重复图像进行统计平均的结果.

按照本文对破碎长度的定义,并没有把 4 种卡波姆凝胶的第 1 种破碎模式(封闭边界模式)下的破碎长度统计在内.图 11 是 4 种卡波姆凝胶在

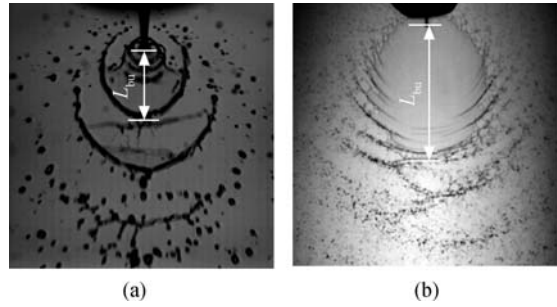


图 10 破碎长度的测量方法

Fig. 10 Measuring method of breakup length

不同 We 下的破碎长度曲线,以及用线性稳定性分析得到的破碎长度曲线. Ryan 等^[18]对无黏模型和黏性模型的稳定性分析发现,两种模型的最大扰动增长率在研究的条件下是相同的,并推导出破碎长度的表达式

$$L_{bu}/d = 5.451 s^{-2/3} [We \cdot f(\theta)]^{-1/3} \quad (4)$$

式中 L_{bu} 为液膜的破碎长度, s 为气液密度比.

$$f(\theta) = (1 - \cos \theta)^2 / \sin^3 \theta \quad (5)$$

式中 θ 为射流撞击夹角的一半.

本实验对破碎长度随 We 变化的理论结果与实验结果进行对比,见图 11.从图 11 中可以看出, $w_c = 0.15\%$ 和 0.25% 的卡波姆凝胶的破碎长度变化趋势相近,都随 We 的增大,先有大幅度变大,然后开始变小.当 $We > 4000$ 时,随 We 数增大破碎长度减小幅度比较小,与理论结果走势几乎一致,只是理论结果比实验结果大一些,这与 Baek 等^[13]对水撞击射流液膜的破碎长度的研究结果是一致的.说明在黏度比较低的情况下,稳定性理论估计的破碎长度比实验结果要大.

对于 $w_c = 0.35\%$ 和 0.50% 的卡波姆凝胶,它们的破碎长度曲线与前两种液体区别比较明

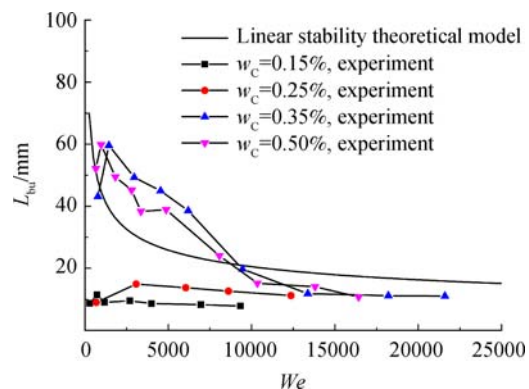


图 11 4 种卡波姆凝胶在不同 We 下的破碎长度曲线
Fig. 11 Breakup length curves of four kinds of Carbopol gel with different Weber numbers

显,在 $We < 8000$ 时,破碎长度实验结果比理论结果大些,而在 $We > 8000$ 时,破碎长度实验结果比理论结果稍小一些.这主要是两种液体在 We 比较小时黏度很大,抑制了液膜的破碎发展,导致破碎长度实验结果开始时比理论结果要大.在 We 增大到 8000 左右时,液膜已经开始达到“完全发展模式”,在这种模式下, We 再增加,破碎长度开始小幅度减小,最后趋于稳定,这与理论结果一致.

4 种卡波姆凝胶的破碎长度随 We 变化曲线,在起始时都有小幅度增加,这与破碎模式的转变有关,在从封闭边界模式进入其他模式时,破碎长度有一定的波动.

该破碎长度的理论模型对幂律流体在液膜破碎达到完全发展模式时,理论结果与实验得到的破碎长度符合较好.

3 结 论

本文采用高速摄影机对 4 种卡波姆凝胶撞击射流液膜的破碎现象进行实验研究,研究了卡波姆凝胶撞击射流液膜破碎的相关特性,得到以下结论:

1) 4 种不同流变特性的卡波姆凝胶出现的破碎模式有所不同,出现了 5 种破碎模式:封闭边界模式、开边界模式、无边界模式、弓形液线模式和完全发展模式,而且黏性越大的卡波姆凝胶,破碎模式越复杂.

2) 通过对比 We 与 Re_{gen} 的雾化模式分布图,当 We 为 8000 左右时,4 种卡波姆凝胶达到“完全发展模式”.

3) 喷雾锥角随着韦伯数 We 的增大而增大并最终趋于稳定值,该值小于射流撞击夹角;随 ω_c 的增大,最大喷雾锥角逐渐减小,最终收敛于 60° .

4) 随着 We 的增大,4 种卡波姆凝胶的破碎长度先小幅变大然后减小,理论结果与实验结果整体趋势相似.

参考文献:

- [1] Savart F. Mémoire sur la constitution des veines liquides lancées par des orifices circulaires en mince paroi[J]. Annales de Chimie et de Physique, 1833, 53(337): 257-310.
- [2] Heidmann M F, Priem R J, Humphrey J C. A study of

sprays formed by two impinging jets[R]. National Advisory Committee for Aeronautics, NACA-TN-3835, 1957.

- [3] Dombrowski N, 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.
- [4] Dombrowski N, Hasson D. Some aspects of liquid flow through fan spray nozzles[J]. Chemical Engineering Science, 1960, 12(1): 35-50.
- [5] Lai W H, Huang W, Jiang T L. Characteristic study on the like-doublet impinging jets atomization[J]. Atomization Spray, 1999, 9(3): 277-289.
- [6] Huang J C P. The breakup of axisymmetric liquid sheets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 43(2): 305-319.
- [7] 伊吉明,白富强,杜青,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 Jiming, BAI Fuqiang, DU 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. (in Chinese)
- [8] Chojnacki K T, Feikema D A. Atomization studies of gelled liquids[R]. AIAA 94-2773, 1994.
- [9] Chojnacki K T, Feikema D A. Atomization studies of gelled bipropellant simulants using planar laser induced fluorescence[R]. AIAA 95-2423, 1995.
- [10] Von Kampen J, Alberio F, Ciezki H K. Spray and combustion characteristics of aluminized gelled fuels with an impinging jet injector[J]. Aerospace Science and Technology, 2007, 11(1): 77-83.
- [11] Yang L, Fu Q, Qu Y, et al. Breakup of a power-law liquid sheet formed by an impinging jet injector[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 39: 37-44.
- [12] Jayaprakash N, Chakravarthy S R. Impingement atomization of gel fuels[R]. AIAA-2003-316, 2003.
- [13] Baek G, Kim S, Han J, et al. Atomization characteristics of impinging jets of gel material containing nanoparticles[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2011, 166(21/22): 1272-1285.
- [14] 曹建明. 喷雾学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [15] Dodge D W, Metzner A B. Turbulent flow of non-Newtonian systems[J]. AIChE Journal, 1959, 5(2): 189-204.
- [16] Metzner A B, Reed J C. Flow of non-Newtonian fluids-correlation of the laminar, transition, and turbulent-flow regions[J]. AIChE Journal, 1955, 1(4): 434-440.
- [17] Lee J K. Breakup characteristics of gelled propellant simulants with various gelling agent contents[J]. Journal of Thermal Science, 2010, 19(6): 545-552.
- [18] Ryan H M, Anderson W E, Pal S. Atomization characteristics of impinging liquid jets[J]. Journal of Propulsion and Power, 1995, 11(1): 135-145.

(编辑:王碧琚)