



液体射流及其破碎特性研究进展

邱发成, 张 昊, 贺世豪

引用本文:

邱发成, 张 昊, 贺世豪. 液体射流及其破碎特性研究进展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(6): 240–246.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

射流闪蒸研究进展及其应用

Research progress and application of the jet flash evaporation

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(3): 207–214 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.03.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.03.026)

基于Van der Pol方程的双脉冲射流控制机理研究

Study on the control mechanism of dual pulsed jets based on the van der pol equation

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(1): 91–97 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.01.011)

某直流喷嘴喷射雾化过程的数值模拟

Numerical simulation on spray characteristics of a direct current nozzle

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(3): 215–222 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.03.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.03.027)

喷头润湿性对EHD打印射流形态影响的数值模拟

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(6): 309–315 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.06.038](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.06.038)

核燃料裂变破碎过程中静力学和动力学受力分析的对比研究

A Comparative Study of Static and Dynamic Forces Analysis in the Process of Fission and Fragmentation of Nuclear Fuel

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(3): 100–105 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.03.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.03.013)



液体射流及其破碎特性研究进展

邱发成, 张昊, 贺世豪, 李文生, 全学军

(重庆理工大学 化学化工学院, 重庆 400054)

摘 要:液体的射流破碎及雾化是一个复杂的非线性动力学演变过程。随着相关研究成果在生活上、工程上的实际应用, 研究学者结合实验测量、数值模拟仿真等手段, 对其进行了大量的探索。结合国内外研究现状, 介绍了射流破碎的3种方式, 即自由射流、气流中的射流雾化及射流撞击雾化。总结了破碎雾化的发生机制, 并概括了在各种环境下, 喷嘴结构、气流条件以及撞击情况等众多因素对其破碎模式、液滴分布、液滴尺寸等方面的影响。对于现阶段的相关研究进行了总结与展望, 可为射流破碎相关研究提供思路。

关键词:液体射流; 破碎机制; 横向气流; 撞击雾化

中图分类号: TQ028

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2022)06-0240-07

0 引言

液体流动的不稳定性是流体力学中被广泛讨论的问题, 也是造成射流破碎的原因。射流破碎是指液体从相对狭小的孔径射出, 由于不稳定性导致部分液体从射流液柱中脱落的现象。这种射流破碎现象普遍存在于当今社会的方方面面, 如生活中的水龙头、淋浴头、喷泉、消防枪等^[1], 并大量运用于食品、医药、化工、环境、航空航天等诸多领域^[2-3]。国内外学者进行了大量射流破碎行为研究后发现, 射流过程的基本演变行为大致可描述为: 当射流进入无限大空间的静止流体中时, 由于湍流的脉动, 卷吸周围静止流体进入射流, 两者

掺混向前运动。上述情况会导致射流断面不断扩大, 流速不断降低, 而流量沿程增加。由于射流边界处的流动是一种间隙性的复杂运动, 所以射流边界实际是交错组成的不规则面, 即射流边界层的宽度小于射流的长度, 射流边界层的任何断面上, 横向分速远小于纵向(轴向)。在实际研究中, 常按照统计平均概念将其视为直线。

实际上, Rayleigh^[4]早在一个多世纪之前就对液体射流中的圆柱射流进行了理论研究, 发现液体的表面张力是导致射流破碎的原因。Weber^[5]探究了不同液体物理参数对射流状态的影响机制, 并提出了无量纲韦伯数用于指导相关研究。Taylor^[6-7]发现当液体进入符合条件的气流中时,

收稿日期: 2021-08-23

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究计划青年基金项目(KJQN202001112, KJQN201901149); 重庆理工大学科研启动基金项目

作者简介: 邱发成, 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事化工流体机械研究, E-mail: qfcandy@cqut.edu.cn; 通讯作者 李文生, 男, 博士, 讲师, 主要从事化工过程强化研究, E-mail: liwensheng@cqut.edu.cn。

本文引用格式: 邱发成, 张昊, 贺世豪, 等. 液体射流及其破碎特性研究进展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(6): 240-246.

Citation format: QIU Facheng, ZHANG Hao, HE Shihao, et al. Research progress of liquid jet and its breakup characteristics[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(6): 240-246.

射流破碎形成的液滴可以进一步破碎,雾化形成更小的液滴。

针对不同应用场景,众多学者研究了多种射流破碎形式及其背后的主要影响因素。依据空气与液体射流相互作用机制的不同,可分为如液体自由射流、气流中的射流雾化及射流撞击雾化。事实上,自由射流与撞击射流雾化主要是液体自身的射流行为,其演变行为的差异主要与射流喷嘴的构型有关。气流中射流雾化主要是由于射流发生在有气流的条件下。上述3种液体射流模式在实际工程中应用较为广泛。为此,立足于3种液体射流破碎形式,综述近期射流破碎方面的研究情况,为相关研究提供参考。

1 射流破碎的影响因素研究

国内外学者通过数值模拟、实验观测等不同方式对射流破碎的影响机制进行了深入研究,发现影响射流破碎的主要因素分为两类,一类是外部物理因素,也就是引发射流产生的喷嘴结构;另一类则是外部环境导致的流体流动状态及不同流体内部物理因素,由相应的无量纲常数(雷诺数、韦伯数及 Oh 数)反映。

1.1 喷嘴结构对射流破碎机制的影响

大量科研结果表明,不同射流喷嘴引发不同的射流破碎机制。射流从喷嘴结构上可大致分为圆孔射流和非圆孔射流。Jiang 等^[8]对3种不同喷嘴锥角的圆形喷嘴进行射流破碎实验,发现随着喷嘴锥角的增加,射流破碎长度减小,射流表面波的初始振幅增加。Abhijeet 等^[9]认为喷嘴出口的不同几何形状能改变射流发生前的流动方式,对射流产生不稳定性的作用至关重要。Rajesh 等^[10]在探究非圆形孔径液体射流界面震荡的过程中,采用椭圆形、三角形、正方形进行实验探索发现:对于相同的射流速度,不同的孔口是导致不同的液体射流波长的原因进而产生不同的射流破碎情况。而相关学者在对矩形孔射流的相关研究中表示:不同的喷嘴尺寸会产生不同的液滴尺寸及不同的液滴序列。并且通过增加矩形喷嘴的纵横比,使得射流中的轴转换波长增加进而导致更短的分裂长度,增加了固有了不稳定性效应^[11-13]。

Etzold 等^[14]使用长径比很小的喷嘴进行实验,得出的数据结论与现有液体射流破裂长度相关的理论研究并不一致。Wu 等^[15]也表明喷嘴直径显著影响着破碎时间和破碎长度。喷嘴的尺寸和形状是获得理想的射流破碎情况的必要参考条件。

1.2 流体特性及环境对射流不稳定性的影响

流体的流态环境及流体自身的特性也是影响射流情况下破碎的关键因素。Yi 等^[16]在射流破碎研究中得出液体流速是射流破碎的主要条件,而粘性则在射流的不同状态下有着不同的影响程度。Bravo 等^[17]发现在燃料射流中,雷诺数的大小影响着破碎模式,并且黏度大的燃料显著延迟了不稳定性波的初始状态并会产生更细的液滴。Liang 等^[18]探索了雷诺数对于液滴破碎的影响机理发现:射流雷诺数不仅主导着液滴破碎模式还是子液滴体积的主要控制条件。在射流破碎长度研究方面,万云霞等^[19]在圆孔射流破碎的实验中,利用雷诺数与破碎长度间的相关性研究,分析了卫星液滴和主液滴的形成及运动规律(如图1所示)。

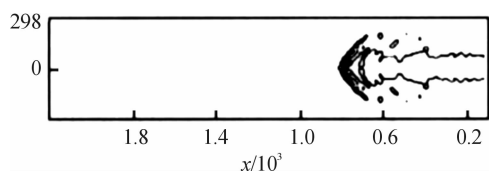


图1 基于雷诺数与破碎长度间的液体射流破碎示意图

在对有空气夹带的射流实验中发现,卷吸进入射流中的空气对射流破碎行为有一定的延迟作用^[20]。Shi 等^[21]在水射流中加入纳米材料发现:纳米粒子对射流不稳定性的影响主要是由增强黏度和空化促进引起。而对纳米流体的研究中,纳米粒子浓度升高,导致流体韦伯数降低,破碎液滴的平均直径变小。而在临界浓度中有效表面张力被最小化,破碎液滴直径也被最小化^[22]。在对非牛顿流体的射流破碎研究中发现无量纲破碎长度与雷诺数呈线性增长关系^[23]。而在存在气泡的非牛顿流体中,表面张力、气泡的存在更加有利于射流破碎的产生^[24]。

2 气流中的液体射流破碎特性

发动机、航空、发电系统等领域对射流破碎有

着更严格的要求。气流中的液体破碎机理是众多学者探索的方向。现有的理论体系主要对低速横向气流和高速横向气流中的射流破碎进行研究。

2.1 横流中的雾化特性及低速横流中的射流破碎

雾化是射流破碎产生的液滴在横向气流剪切作用下进一步破碎成更加细小的液滴,其破碎模式由 R-T(Kelvin-Helmholtz)不稳定性和 K-H(Reyleigh-Taylor)不稳定性共同主导,使得破碎过程为柱状破碎和表面破碎^[25-26],如图 2 所示。对于有横向气流参与的过程,破碎过程可分为初级破碎、柱状破碎和二次雾化三大类,如图 3 所示^[27]。

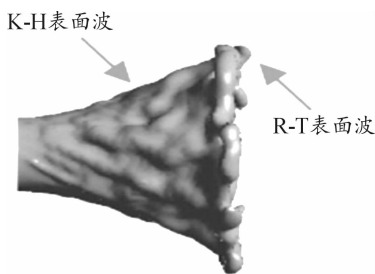


图 2 2 种表面波的作用位置示意图

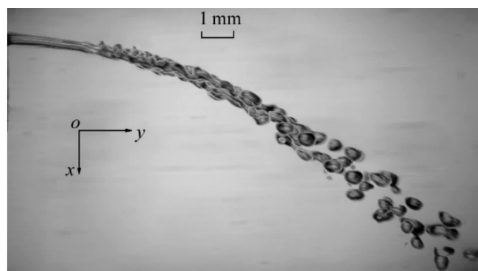


图 3 横向气流下射流破碎过程示意图

Song 等^[28]介绍了水-柴油混合物在空气横流中的雾化特性,不混溶的水和柴油在喷雾场中没有显著的混合从而可根据液滴尺寸来判断混合物中的水含量。Guo 等^[29]在对紊流流体燃料射流的研究中发现提高气体的密度和增大气体流速都能改善其破碎效果,提高燃烧效率。在横流中液体射流进入条件的探究中证实:与层流射流相比,湍流射流表现出不同的破碎模式并且雾化更快更有效^[30]。Huang 等^[31]对射流雾化进行数值模拟发现环境气体温度升高有助于稳定液柱界面运

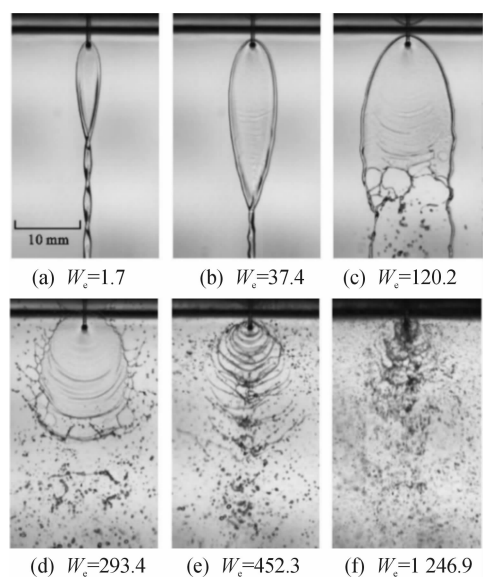
动,延缓射流破碎时间。喷嘴形状的不同使得射流在气流中的迎风面积不同也是破碎的影响因素。通常有着较大的迎风面积,横流的剪切作用更强,会产生更小的液滴直径^[32]。Taisuke 等^[33]对发动机燃烧室中的横流雾化研究表示:R-T 不稳定性在液柱边缘占主导地位并且室温不稳定的情况下,雾化液滴尺寸明显变化。对于低速横流射流破碎的研究中,兰天等^[34]提出液气动量通量比和液体韦伯数主导着其射流破碎行为模式,Olyaei^[35]发现除了喷嘴孔径外,喷嘴相对于横流的位置对射流穿透,破碎长度等有直接的影响。Shi 等^[36]则讨论了低气体韦伯数下纳米添加剂对射流的影响,得出低浓度的纳米颗粒添加剂对于射流内部的不稳定性有明显的增强作用。

2.2 高速横向气流中的射流破碎

高速横流主要是对亚声速气流和超声速气流情况下的研究。对于亚声速横流中的射流破碎研究中表明,横流的湍流强度影响射流表面不稳定性,是其破碎模式的主要因素^[37],但横流速度并非射流柱纵向表面波长的关键因素^[38]。在超声速横流中射流破碎的研究中,Li 等^[39]研究了其液体雾化特性,试验结果表明超音速横流中的喷雾截面近似为 ω 形,截面液滴尺寸范围和尺寸分别取决于气动力和横向距离。Zhu 等^[40]观察到与稳定射流相比,速度脉冲射流产生了不同的雾化形态并且射流穿透率和尾流区宽度显著扩大,能改善雾化和混合性能。Hu 等^[41]发现当液体射流中伴有气体射流时,液体射流的穿透力则会显著增强。而在具有扩张截面的燃烧室导致超音速气流方向和强度变化,气流决定了喷雾扩散的方向从而会影响其破碎模式^[42]。Li 等^[43]也提出气流结构对液滴的混合过程有显著影响。

3 射流撞击破碎特性研究

撞击式射流雾化在液体火箭发动机等领域已成熟应用,雾化效果往往在应用中起着关键的作用。因此,不少学者进行了射流撞击雾化特性方面的研究。如图 4 所示^[44],表示为相同射流角度下,不同 We 数下的射流撞击破碎特性。

图4 不同 We 数下的射流撞击破碎特性

3.1 射流撞击破碎的影响因素

在双股射流撞击雾化中,撞击角度是关键的影响因素,雾化角随着撞击角的减小而减小,但液膜的破碎长度是增大的。孔径比增大雾化角同样增大,但也使得雾化不充分产生较大的液滴尺寸。动量比方面则对雾化角影响有限,并且射流表面波的不稳定性受射流湍流强度的影响^[45-48]。李佳楠等^[49]探究了强迫扰动下的射流撞击雾化,观察显示:扰动环境下的喷雾场的液滴分布并不像自然喷雾场中的分布均匀,同时液膜破碎的长度随着幅值的增大而减小。撞击液膜运动行为也影响着初级破碎液滴的分布和初始速度^[50]。随着射流 We 数的增大,撞击形成液膜的模式也从稳定模式变为振荡模式,雷诺数的增大也会使得射流撞击形成均匀液滴的尺寸逐渐下降^[51],这对雾化效果有促进作用^[52]但撞击角及射流速度对液膜的形状尺寸影响却十分有限^[53]。撞击射流虽然有良好的混合特性,但 Bruno 等^[54]在多重射流撞击的研究中表明:当射流数量增加时雾化效率反而会降低。

在射流撞击垂直板的破碎特性的实验表明:射流破碎产生的液滴冲击在靶板上形成的液膜上时会形成飞溅现象,并且当射流韦伯数足够大的时候飞溅率趋于稳定^[55]。当改变其射流速度时可以观察到不同的射流破碎状态并影响其飞溅现象^[56]。Zhan^[57]在射流撞击平面固体表面的研究

中了飞溅的二次破碎形成的液滴尺寸由初级破碎的液滴尺寸决定并建立了比例关系。当射流撞击到圆柱形防溅板上时,平均液滴直径受射流速度大小的影响而对防溅板的表面直径不敏感^[58]。

3.2 射流撞击雾化的实际应用

由于射流撞击形成理想的雾化效果,在众多领域有着广泛的运用。Roxana 等^[59]在射流雾化反应器中,以二氧化钛纳米粒子和硝基苯酚的两个射流撞击,极大增强了混合效果实现高效率的传质。Hafezi 等^[60]设计构建了射流撞击雾化反应器作为新型 UV/H_2O_2 反应器,并且还可以快速、连续的用于处理较低污染物浓度的水处理情况。在液体火箭动力系统中具有剪切希化特性的非牛顿流体的射流撞击也在该领域是被广泛采用的雾化手段^[61-62]。在研发火箭推进剂方面,凝胶材料相比于水来讲,射流撞击雾化更彻底,更有利于其领域应用^[63]。

4 结论

液体射流作为一种性能稳定、结构简单、维护简便的高效传质技术,被广泛地应用于石油化工、能源环境等领域。从自由射流、气流中的射流雾化及射流撞击雾化出发,总结了数值模拟与实验研究方面的射流破碎雾化形成演变行为,概述了其影响因素和射流破碎相关的研究成果。然而,射流破碎雾化是一个复杂的非线性动力学演变过程,具有典型准周期的三维高维动力系统,在时空尺度上具体呈现出跨越数个数量级旋涡与涡流的非线性混沌演化过程,伴随流动形态的非稳态随机脉动现象,其流动信号蕴含大量具有时空混沌的时频特征。为此,还需考虑射流破碎过程中局部特征行为。随着时频特征分析技术的不断发展,分数阶 Fourier 变换方法被广泛应用于提取与分析具有非线性非平稳时频特征的动力学行为。实质上,分数阶傅里叶变换具有明显的时频旋转特性,随着变换阶次从 0 到 1 的连续变化,它能将从时域到频域变化过程中的所有特征呈现出来。因此,建立基于数阶 Fourier 变换的射流破碎雾化局部特征分析方法对丰富射流破碎雾化理论具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李帅兵, 司廷. 射流破碎的线性不稳定性分析方法[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(3): 356-372.
- [2] 司廷, 李广滨, 尹协振. 流动聚焦及射流不稳定性[J]. 力学进展, 2017, 47: 178-226.
- [3] 张冲, 焦光伟, 祝韬, 等. 圆锥长直管段喷嘴内流场仿真研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(12): 105-110.
- [4] RAYLEIGH L. On the capillary phenomena of jets[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1879, 29(196/199): 71-97.
- [5] WEBER C. Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles[J]. ZAMM-Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1931, 11(2): 136-154.
- [6] TAYLOR G I. Experiments with rotating fluids[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1921, 100(703): 114-121.
- [7] TAYLOR G I. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1923, 223(605/615): 289-343.
- [8] JIANG Y, LI H, HUA L, et al. Three-dimensional flow breakup characteristics of a circular jet with different nozzle geometries[J]. Biosystems Engineering, 2020, 193: 216-231.
- [9] KUMAR A, SAHU S. Influence of nozzle geometry on primary and large-scale instabilities in coaxial injectors[J]. Chemical Engineering Science, 2020, 221: 115694.
- [10] RAJESH K R, SAKTHIKUMAR R, SIVAKUMAR D. Interfacial oscillation of liquid jets discharging from non-circular orifices[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 87: 1-8.
- [11] 雷传超, 邓松圣, 管金发, 等. 淹没型空化水射流流场数值模拟与冲蚀实验研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(12): 71-76.
- [12] MORAD M R, NASIRI M, AMINI G. Axis-switching and breakup of rectangular liquid jets[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 126: 103242.
- [13] 王博滢, 张靖周, 吕元伟. 波瓣喷嘴射流冲击平面靶板对流换热数值研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(4): 87-93, 106.
- [14] ETZOLD M, DESWAL A, CHEN L, et al. Break-up length of liquid jets produced by short nozzles[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 99: 397-407.
- [15] WU S, MEINHART M, PETERSEN B, et al. Breakup characteristics of high speed liquid jets from a single-hole injector[J]. Fuel, 2021, 289: 119784.
- [16] ZHAN Y, KUWATA Y, MARUYAMA K, et al. Effects of surface tension and viscosity on liquid jet breakup[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 112: 109953.
- [17] BRAVO L, KIM D, HAM F, et al. Effects of fuel viscosity on the primary breakup dynamics of a high-speed liquid jet with comparison to X-ray radiography[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3): 3245-3253.
- [18] LIANG W, WANG D, CAI Z, et al. Deformation and breakup of single drop in laminar and transitional jet flows[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 386: 121812.
- [19] 万云霞, 黄勇, 朱英. 液体圆柱射流破碎过程的实验[J]. 航空动力学报, 2008(2): 208-214.
- [20] CHEN J, ZHOU Y, ZHAO J, et al. Experimental and theoretical study of jet hydrodynamic breakup behavior with air entrainment[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 151: 107900.
- [21] SHI W, LI F, LIN Q, et al. Experimental study on instability of round nanofluid jets at low velocity[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 120: 110253.
- [22] ZHUO Z, LI S, LU Y, et al. Synergetic effects of nanoparticle concentration and electrification on the breakup performance of nanofluid fuel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 940-950.
- [23] CSIZMADIA P, TILL S, HÖS C. An experimental study on the jet breakup of Bingham plastic slurries in air[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 102: 271-278.
- [24] WANG X, NING Z, LÜ M. Linear temporal instability analysis of a non-Newtonian liquid jet containing cavitation bubbles[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2019, 77: 118-124.
- [25] 张彬, 成鹏, 李清廉, 等. 液体横向射流在气膜作用下的破碎过程[J]. 物理学报, 2021, 70(5): 230-241.
- [26] 王赓, 宁智, 吕明, 等. 圆环旋转黏性射流破碎过程及表面波的研究[J]. 车用发动机, 2018(5): 1-7.
- [27] 朱英, 黄勇, 王方, 等. 横向气流中的液体圆形射流破碎实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2261-2266.

- [28] SONG J, LEE J G. Characterization of spray formed by diesel-water mixture jet injection into an air crossflow [J]. *Fuel*, 2020, 282: 118818.
- [29] GUO J, WANG Y, BAI F, et al. Unstable breakup of a power-law liquid fuel jet in the presence of a gas crossflow [J]. *Fuel*, 2020, 263: 116606.
- [30] SURYA P R, SINHA A, TOMAR G, et al. Liquid jet in crossflow-Effect of liquid entry conditions [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 93: 45–56.
- [31] HUANG J, ZHAO X. Numerical simulations of atomization and evaporation in liquid jet flows [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 119: 180–193.
- [32] YU S, YIN B, BI Q, et al. The influence of elliptical and circular orifices on the transverse jet characteristics at supersonic crossflow [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 185: 124–131.
- [33] NAMBU T, MIZOBUCHI Y. Detailed numerical simulation of primary atomization by crossflow under gas turbine engine combustor conditions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(2): 3213–3221.
- [34] 兰天, 孔令真, 陈家庆, 等. 低速横流作用下液体射流初次破碎实验 [J]. *化工进展*, 2020, 39(4): 1282–1291.
- [35] OLYAEI G, KEBRIAEE A. Experimental study of liquid jets injected in crossflow [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 115: 110049.
- [36] SHI W, LI F, LIN Q. Effects of nanoparticles on the instability of liquid jets in a gaseous crossflow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, 133: 103449.
- [37] BROUMAND M, AHMED M M A, BIROUK M. Experimental investigation of spray characteristics of a liquid jet in a turbulent subsonic gaseous crossflow [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3237–3244.
- [38] 刘日超, 乐嘉陵, 杨顺华, 等. 亚声速横向气流中液体射流破碎过程的直接模拟 [J]. *推进技术*, 2016, 37(11): 2135–2141.
- [39] LI C, ZHOU Y, CHEN H, et al. Cross-sectional droplets distribution of a liquid jet in supersonic crossflow [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 186: 109–117.
- [40] ZHU Y H, XIAO F, LI Q L, et al. LES of primary breakup of pulsed liquid jet in supersonic crossflow [J]. *Acta Astronautica*, 2019, 154: 119–132.
- [41] HU R, LI Q, LI C, et al. Effects of an accompanied gas jet on transverse liquid injection in a supersonic crossflow [J]. *Acta Astronautica*, 2019, 159: 440–451.
- [42] ZHAO J, REN Y, TONG Y, et al. Atomization of a liquid jet in supersonic crossflow in a combustion chamber with an expanded section [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 180: 35–45.
- [43] LI P, WANG Z, BAI X, et al. Three-dimensional flow structures and droplet-gas mixing process of a liquid jet in supersonic crossflow [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 90: 140–156.
- [44] 郑勃, 白富强, 杨子明, 等. 不同环境压力下幂律流体撞击射流破碎特性 [J]. *内燃机学报*, 2019, 37(1): 76–83.
- [45] 刘昌波, 雷凡培, 周立新. 两股湍流射流撞击雾化过程的数值研究 [J]. *推进技术*, 2014, 35(12): 1669–1678.
- [46] 邱发成, 贺世豪, 熊沛, 等. 射流闪蒸研究进展及其应用 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(3): 207–214.
- [47] 郑刚, 聂万胜, 何博, 等. 撞击角对撞击式喷嘴雾化特性影响研究 [J]. *推进技术*, 2015, 36(4): 608–613.
- [48] 王宇奇, 勾文进, 陈明慧, 等. 孔径比和动量比对双股射流撞击式雾化影响分析 [J]. *固体火箭技术*, 2021, 44(1): 26–32.
- [49] 李佳楠, 雷凡培, 杨岸龙, 等. 强迫扰动下的射流撞击雾化特性 [J]. *航空学报*, 2020, 41(12): 84–105.
- [50] 费俊, 孙璠, 杨伟东, 等. 射流撞击雾化液滴运动过程与粒径分布特性的试验研究 [J]. *火箭推进*, 2015, 41(1): 10–14, 35.
- [51] KASHANJ S, KEBRIAEE A. The effects of different jet velocities and axial misalignment on the liquid sheet of two colliding jets [J]. *Chemical engineering science*, 2019, 206: 235–248.
- [52] 刘昌国, 施浙杭, 陈锐达, 等. 液体射流撞击液膜振荡行为的实验研究 [J]. *推进技术*, 2019, 40(12): 2748–2754.
- [53] 张伟, 方维, 王树光, 等. 粘性圆柱射流撞击理论研究 [J]. *传感器世界*, 2019, 25(8): 14–20.
- [54] PIZZIOLO B, COSTA M, PANÃO M O, et al. Multiple impinging jet air-assisted atomization [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 96: 303–310.
- [55] ZHAN Y, OYA N, ENOKI K, et al. Droplet generation during liquid jet impingement onto a horizontal plate [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 98: 86–94.
- [56] KIM H, CHOI H, KIM D, et al. Experimental study on splash phenomena of liquid jet impinging on a vertical wall [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020,

- 116:110111.
- [57] ZHAN Y, KUWATA Y, OKAWA T, et al. Experimental study on secondary droplets produced during liquid jet impingement onto a horizon solid surface[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 120:110249.
- [58] ASHGRIZ N, WASHBURN R, BARBAT T. Segregation of drop size and velocity in jet impinging splash-plate atomizers[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1996, 17(5):509-516.
- [59] LARIJANI R S, GHADIRI M, HAFEZI M, et al. Evaluation of mass and photon transfer enhancement by an impinging jet atomization photoreactor for photocatalytic degradation of p-nitrophenol[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2021, 408:113088.
- [60] HAFEZI M, MOZAFFARIAN M, JAFARIKOJOUR M, et al. Application of impinging jet atomization in UV/H₂O₂ reactor operation: Design, evaluation, and optimization [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2020, 389:112198.
- [61] 朱呈祥, 陈荣钱, 尤延铖. 低韦伯数非牛顿射流撞击破碎直接数值模拟[J]. *航空学报*, 2017, 38(8):6-14.
- [62] 朱呈祥, 吴猛, 陈荣钱, 等. 剪切稀化非牛顿射流撞击液膜破碎直接数值模拟[J]. *航空学报*, 2018, 39(5):92-100.
- [63] 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.

Research progress of liquid jet and its breakup characteristics

QIU Facheng, ZHANG Hao, HE Shihao, LI Wensheng, QUAN Xuejun

(College of Chemistry and Chemical Engineering,
Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: The liquid jet breaking and atomization is a complicated nonlinear dynamic evolution process. With the practical application of related research in life and engineering, researchers have made a lot of explorations in combination with experimental measurement, numerical simulation and other means. Combined with the current research status at home and abroad, three methods of jet breaking are mainly introduced, namely, free jet, jet atomization in air flow and jet impinging atomization. The mechanism of breaking atomization and the influence of many factors such as nozzle structure, airflow conditions, and impact conditions on its breaking mode, droplet distribution, droplet size, etc. under various environments are summarized. Finally, it summarizes and looks forward to the relevant research at this stage. This manuscript is expected to provide ideas for the research on jet breaking.

Key words: liquid jet; breakup mechanism; gaseous crossflow; impinging atomization

(责任编辑 宋洁)