

文章编号: 1006-9941(2015)07-0697-12

凝胶推进剂射流撞击雾化研究进展

刘 虎, 强洪夫, 王 广

(第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 凝胶推进剂是一种兼具传统液体/固体推进剂优点、具有良好发展前景的新型火箭推进剂, 雾化问题是凝胶推进技术的关键问题之一, 射流撞击雾化是凝胶推进剂的主要雾化形式。从实验、理论及数值模拟三个方面对凝胶推进剂射流撞击雾化问题发展现状进行了概述。分析表明: 雾化实验可以定性分析流变特性及喷注参数等因素对雾化效果的影响, 雾化理论对液膜形状及破碎特性的预测值与实验还存在一定误差, 雾化数值模拟可以获得射流撞击雾化的典型变化过程。总体上看, 凝胶推进剂雾化机理还未能完全揭示, 未来工作有: 建立凝胶推进剂雾化特性的定量表征方法、基于非牛顿本构关系和撞击式雾化发展新的雾化理论、根据雾化问题的特点改进现有数值计算方法等。

关键词: 凝胶推进剂; 射流撞击雾化; 雾化实验; 雾化理论; 雾化仿真

中图分类号: V43; TJ55; O35

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.07.017

1 引 言

凝胶推进剂是一种新型火箭推进剂, 它不易泄露、能长期贮存、在贮箱中不晃动、对冲击和碰撞等不敏感, 兼有液体推进剂高比冲、推力可调、多次启动和固体推进剂易贮存运输、使用维护比较方便的优势, 在未来新型导弹武器系统中具有广阔的应用前景, 成为世界各国大力研究的新型火箭推进剂^[1-3]。从流变学角度来看, 凝胶推进剂是一种典型的非牛顿流体, 一般用幂律模型描述其流变特性^[4-5]。高质量的雾化是推进剂高效率燃烧的前提和基础, 特殊存在状态在赋予凝胶推进剂优良性能的同时, 也导致其雾化比传统液体推进剂更加困难, 雾化问题一直是凝胶推进技术的重点问题之一。

近年来, 各国研究人员以传统推进剂的雾化研究为基础, 从实验、理论及数值模拟三个方面凝胶推进剂的雾化进行了大量深入系统的研究, 主要研究内容如图 1 所示。其中, 实验研究是凝胶推进剂雾化研究的主要手段, 雾化实验采用真实凝胶推进剂或与凝胶推

进剂具有相似流变特性的模拟液进行, 以射流撞击雾化(尤其是双股射流撞击雾化)为主要雾化形式, 通过改变实验工况, 得到撞击雾化图像, 分析雾化特性; 目前, 凝胶推进剂的雾化机理尚未完全明确, 雾化理论研究主要在牛顿流体雾化理论的基础上, 加入非牛顿流体本构关系, 分析液膜的稳定性、破碎长度等特性, 理论预测与实验结果之间还存在一定的差距; 作为实验研究的重要辅助手段, 凝胶推进剂的雾化数值模拟研究发展相对缓慢。近年来, 得益于计算方法的进步和计算能力的提高, 研究人员或基于高性能计算平台、或采用新型计算方法, 应用数值模拟的方法对凝胶推进剂的雾化问题进行了一定的探索, 取得了一些有益的研究成果。

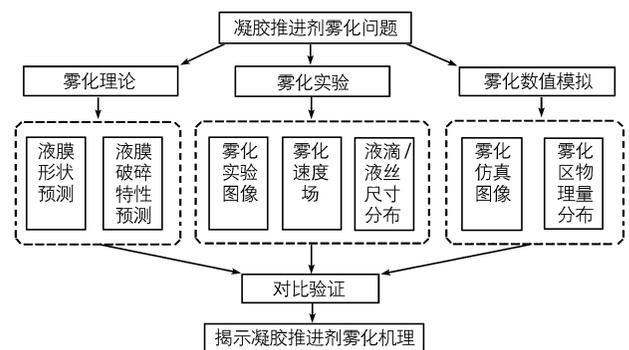


图 1 凝胶推进剂雾化研究的三个方面

Fig. 1 Three main aspects of gelled propellant atomization research

收稿日期: 2014-11-14; 修回日期: 2015-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助(51276192)

作者简介: 刘虎(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事凝胶推进剂雾化问题研究。e-mail: richardliu1987@163.com

通信联系人: 强洪夫(1965-), 男, 博导, 主要从事含能材料力学性能研究。e-mail: qiang@263.com

本文针对凝胶推进剂射流撞击雾化问题,从雾化实验、雾化理论及数值模拟三个方面进行了概述,分析了目前的研究现状、存在问题,并对未来的发展趋势进行了预测。

2 凝胶推进剂雾化实验研究

实验研究是凝胶推进剂雾化研究的主要手段,典型的雾化实验设备如图 2 所示^[6],凝胶推进剂通过喷注器喷出形成射流,射流撞击后形成液膜并进一步的破碎形成液丝及液滴,通过高速摄影系统获得雾化图像。凝胶推进剂雾化效果一般沿用液体推进剂的表征方法^[7],采用喷雾角 2θ (射流撞击后形成液膜的展开角度)、液膜破碎长度 (从撞击点到液膜破碎成液丝的距离)、索太尔平均直径 (Sauter mean diameter, SMD)

等参数进行表征,喷雾角越大、液膜破碎长度越小、SMD 越小,雾化效果越好。凝胶推进剂雾化实验研究概况见表 1。由表 1 可以看出,实验研究的主要方法

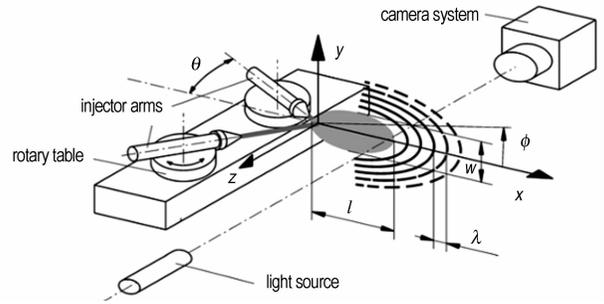


图 2 基于双股撞击式喷嘴的凝胶推进剂雾化实验装置示意图^[6]
Fig. 2 Sketch of jet impingement experiment equipment based on doublet jet injector^[6]

表 1 凝胶推进剂雾化实验研究概况

Table 1 Situation of gelled propellant atomization experiment research

year	main researchers	gelled propellants or simulants	research subject
1994 1997	Kent T Chojnacki ^[8-9]	(1) Carbolol 941;(2) CMC; (3) Percol 10;(4) Mineral Oil(Light).	(1) influence of rheology on atomization; (2) Theory analysis of liquid sheet shape and breakup characteristics.
2001	Shai Rahimi ^[10]	Gelled water	Influence of rheology on atomization ¹⁾ .
2003	N Jayaprakash ^[11]	Kerosene /organophilic clay/ propylene glycol/Al	Influence of injection pressure and impinging angle on atomization.
2005	Victor Chernov ^[12]	Gelled water	Influence of periodic disturbances on atomization ¹⁾ .
2006 2007	J von Kampen ^[6,13]	Jet A-1/ Thixatrol ST/Miak/Al	Influence of Al particle concentration, impinging velocity on atomization.
2008 2009	ZHANG Meng-zheng ^[14-15]	Gelled water	Influence of rheology, impinging angle, jet velocity, etc, on atomization.
2009	M. D. James ^[16]	JP-8/Fumed silica	Calibration of an impinging jet injector.
2009 2010	Syed Fakhri ^[17-18]	Water/Carbolol 981A	Influence of nozzle geometry on atomization.
2009	Klaus Madlener ^[19]	(1) Paraffin/Thixatrol ST;(2) Paraffin/Aerosil-200; (3) Jet A-1/Thixatrol ST; etc.	Influence of rheology on atomization.
2010	Michele Negri ^[20]	(1) Water/PEO/Glycerol; (2) Water/Methocel; (3) Carbolol.	Influence of rheology on atomization.
2010	Inchul Lee ^[21]	Ionized water/NaOH /Carbolol 941	Influence of gelling agent concentration on atomization ¹⁾ .
2010 2012	Jennifer Mallory ^[22-24]	(1) Water/HPC; (2) Water/CMC; (3) Water/XG; etc.	(1) Influence of rheology, jet velocity, impinging angle and injector geometry on atomization; (2) Theory analysis of liquid sheet breakup characteristics.
2011	Sungjune Jung ^[25]	(1) PS/DEP; (2) PEO/GW	Influence of fluid elasticity on atomization.
2011	Gookhyun Baek ^[26]	(1) Water/C934 Carbolol (2) Water/C934 Carbolol/SUS304	Influence of rheology, jet velocity on atomization.
2012 2013 2014	YANG Li-jun, FU Qing-fei ^[27-29]	Gelled water	(1) Influence of jet velocity, injector geometry and temperature on atomization; (2) Theory analysis of liquid sheet breakup characteristics.
2013	Manisha B. Padwal ^[30]	Jet A-1/Thixatrol ST/Xylene	Influence of processing temperature and gellant concentration on structural stability and atomization.
2014	Neil S. Rodrigues ^[31]	(1) Water/Agar; (2)Water/Kappa Carrageenan.	Influence of impinging angles, free jet length to orifice diameter ratios, and internal length to orifice diameter ratios on atomization.
2014	CHEN Jie ^[32-33]	Gel simulant (simulating gelled H ₂ O ₂)	Influence of injection pressure and impinging angle on atomization.

Note: 1) Triplet air blast atomizer.

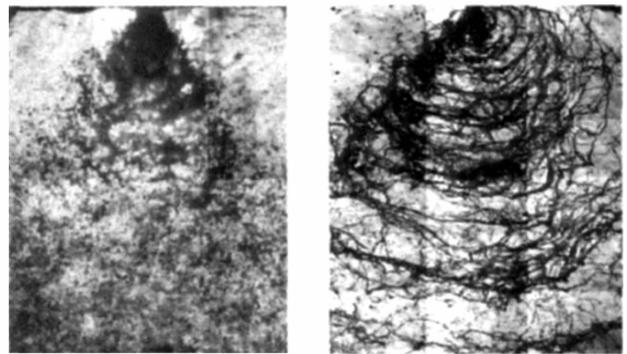
是通过改变凝胶推进剂类型/配方、改变喷注器夹角、更换喷注器、调节喷注压力等实验参数,实现凝胶推进剂流变参数和喷注参数的变化,从而获得不同工况下的雾化图像,而后,通过图像对比及理论分析等手段,研究各参数对于雾化特性的影响。下面分别从流变特性及喷注参数两个方面对凝胶推进剂雾化实验的研究现状加以具体分析。

2.1 流变特性对雾化的影响

流变特性的不同是导致凝胶推进剂与传统推进剂在雾化方面存在差别的根本原因。凝胶推进剂的流变特性对雾化影响的研究主要通过两种方式进行:一是应用牛顿流体(水或传统液体推进剂)与凝胶推进剂(模拟液)进行对比实验,Chojnacki^[9]、Rahimi^[34]、Syed^[17]、张蒙正^[15]等的研究文献中包括了此类内容,均采用了水与水基凝胶(模拟凝胶推进剂)对比的方法研究凝胶的雾化特性,获得的典型雾化图像如图3所示,其主要研究结论包括:(1)水与水基凝胶的雾化区均为扇形;(2)水基凝胶液膜的破碎特性与水有很大不同;(3)水基凝胶比水更难以雾化等。

二是使用具有不同流变参数的凝胶推进剂模拟液进行对比实验,研究流变参数变化对于雾化效果的影响。此类研究包括:Chojnacki^[8]使用了羧乙烯聚合物(Carbopol 941)、羧甲基纤维素(Carboxymethylcellulose, CMC)、轻质矿物油,张蒙正等^[14]使用了三种具有不同胶凝剂含量的水基凝胶模拟液,Madlener等^[19]使用了煤油凝胶、Jet A-1 凝胶及乙醇凝胶, Lee使用了两种具有不同浓度聚羧乙烯(Carbopol)的水基凝胶,Rodrigues等^[31]使用了分别添加琼脂(Agar)、κ角叉菜胶(Kappa Carrageenan)作胶凝剂的水基凝胶,Mallory^[24]使用了羟丙基纤维素(Hydroxypropylcellulose, HPC)、CMC、黄原胶(Xanthan gum, XG)等10种物质作胶凝剂的水基凝胶(图4)等。从以上研究中可以得到的共性结论为:胶凝剂的含量对雾化的影响很大,一般情况下,胶凝剂含量越高,凝胶体系粘度越高,雾化效果越差。同时,以上研究中一些非共性的结论也值得关注,例如:(1)张蒙正等发现,凝胶推进剂雾化过程中剪切速率很高,雾化区内的粘度基本达到极限剪切粘度,因此,他们认为极限剪切粘度是影响凝胶推进剂雾化的主要因素^[14];(2)Madlener等在使用基于HBE流变模型的广义雷诺数 $Re_{gen,HBE}$ 和临界雷诺数 $Re_{crit,HBE}$ 对雾化特性进行表征时发现,由于凝胶推进剂雾化的复杂性,只依靠雷诺数表征其雾化特性是远远不够的,还需要对凝胶雾化体系进行更加

深入细致的研究^[19];(3)Mallory通过对比HPC凝胶和琼脂凝胶的雾化特性发现,HPC凝胶在不论何种射流速度和喷注器形状下都不会雾化,而琼脂凝胶更容易雾化,他认为这是由于HPC的分子特性导致了在凝胶化的过程中产生了聚合物长链的缠绕所造成的,因此,他得出结论,胶凝剂与溶剂在分子层面的相互作用对雾化效果产生的影响更为关键^[24]。



a. water

b. gelled water

图3 水与水基凝胶的雾化图像对比^[15]

Fig. 3 Comparison of the atomization of water and gelled water^[15]



图4 Mallory制备的水基凝胶推进剂模拟液^[24]

a—Water/HPC凝胶, b—Water/Cekol MW2000凝胶, c—Water/Agar凝胶, d—Water/XG凝胶(4%), e—Water/XG凝胶(20%), f—Water/Cekol MW 3000凝胶

Fig. 4 Water-based gel propellant simulants made by Mallory^[24]

a—Water/HPC gel, b—Water/Cekol MW2000 gel, c—Water/Agar gel, d—Water/XG gel (4%), e—Water/XG gel (20%), f—Water/Cekol MW 3000 gel

以上研究使用的凝胶推进剂(模拟液)中均不含固体颗粒,事实上,固体颗粒的添加有助于提高凝胶推进剂的能量性能,对凝胶推进剂的流变和雾化特性都存在着重要的影响^[35],目前,公开报道的含固体颗粒的凝胶推进剂的雾化研究十分有限,2003年,Jayaprakash等^[11]使用了含铝颗粒的煤油凝胶进行实验,但是,从其研究中难以得出铝颗粒的添加对雾化的影

响; 2007 年, Kampen 等^[6]对添加不同浓度的铝颗粒的凝胶 Jet A-1 燃料的流变、雾化及燃烧特性进行了详细研究, 结果表明, 所有添加铝颗粒的凝胶均表现出明显的屈服应力, 铝浓度的增大造成剪切粘度的增大, 会使液膜的宽度增大、破碎长度增长; 当改变广义雷诺数及铝颗粒浓度时, 会出现射线型、液丝型、完全发展型等三种不同的雾化模式(图 5); 2011 年, Baek

等^[26]对比研究了水、不含/含 SUS304 颗粒的聚羧乙烯凝胶的雾化特性, 他们研究发现, 随着撞击速度的提高, 水及不含颗粒的聚羧乙烯凝胶形成的液膜均会增大, 但含 SUS304 颗粒的凝胶液膜并不随着速度变化而变化, 含 SUS304 颗粒的凝胶液膜的长宽比基本保持在 2.1 左右, 含 SUS304 颗粒的凝胶的液膜破碎长度更小。

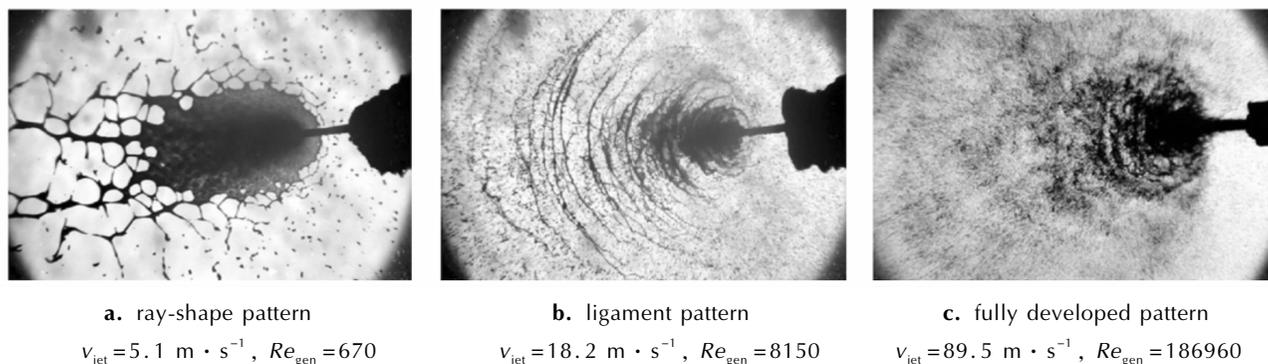


图 5 35% Al/Jet-1 凝胶的三种雾化模式^[6]

Fig. 5 Three different atomization patterns of 35% Al/Jet-1 gel^[6]

2.2 喷注参数对雾化的影响

除凝胶推进剂本身的流变特性外, 喷注参数对于凝胶推进剂的雾化特性也产生着重要影响, 典型的喷注参数包括射流撞击角度、撞击速度、喷注器的结构参数(包括喷口形状、喷口大小、喷口长径比 L/d 等)、自由射流长度(喷口到撞击点之间的距离)等。研究喷注参数对雾化特性的影响可以对凝胶推进系统的设计提供直接参考, 是凝胶推进剂雾化研究的一个重要研究方向。

这方面的典型研究成果有: 张蒙正等^[14-15]使用不同水基凝胶模拟液在不同撞击角度、撞击速度及在射流中预混入气体进行了雾化实验, 研究表明, 增大撞击角和射流速度、减小射流直径、增加喷嘴的粗糙度和在流体中预混入气体均有助于凝胶推进剂的雾化。Chernov 等^[12]使用了可引入扰动的三股撞击气动式喷嘴进行雾化实验, 发现大多数情况下, 扰动的引入可以减小水基凝胶雾化的 SMD。Mallory 等^[22-23]使用 HPC 水凝胶模拟甲基联氨(Monomethylhydrazine, MMH)凝胶推进剂, 研究了喷注器长径比 $L/d = 20$ 、50、撞击速度 $v_{jet} = 19 \sim 140 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的雾化现象, 尽管射流速度明显高于火箭推进系统的标准撞击速度, 但是, 射流撞击后只能形成液膜, 没有观察到液膜破碎形成液滴的现象, 这一现象在其博士学位论文^[24]中进行了解释(2.1 节)。Lee 等^[21]的研究表明, 随着喷注压

力的提高, 凝胶推进剂模拟液撞击雾化后形成的液膜形状由边缘闭合型转化为边缘开放型, 在开放型液膜边缘, 由于气动力作用, 会产生液丝及小的液滴; 在撞击点附近, 可以明显观察到周期性波状结构, 在远离撞击点的下游区域, 可以观察到雾化形成的小的液滴。Syed^[17]等的研究表明, 喷口长径比对水及水凝胶的雾化特性影响明显, 较长的喷注器形成的射流更加稳定, 撞击形成的液膜破碎长度更长。Fakhri 等^[18]应用聚羧乙烯水凝胶在喷口长径比 $L/d = 5, 20$ 时雾化的雾化实验表明, 大的长径比会产生更大的 SMD, 更进一步的研究表明, $L/d = 5$ 时, 高的射流速度会产生更强的表面扰动, 导致射流不能精确撞击。Mallory^[24]研究了喷口长径比 $L/d = 20, 50$ 时对于平均液滴直径的影响, 发现 $L/d = 50$ 时会产生更大的平均液滴直径, 但是, 其研究中长径比的变化并不独立, 因此, 很难得到其它定量的结论。Fu 等^[28]的研究中使用了圆形、椭圆形及长方形喷口, 在不同的喷口形状下, 凝胶推进剂模拟液射流撞击形成的液膜形状有所不同, 方形喷口的射流存在轴向转换特性, 会导致射流撞击形成的液膜的中心线处液体增厚, 液膜的破碎长度比圆形喷口形成的液膜破碎长度要小; 椭圆形喷口形成液膜的破碎长度并不总是比圆形喷口形成的液膜的破碎长度更小, 但是, 非圆形喷口的加工难度较大, 工程应用较为困难。Rodrigues 等^[31]应用相多普勒测速仪实验测量了两种

水凝胶推进剂模拟液雾化后的液滴尺寸和液滴速度,研究表明,撞击角度、自由射流长度及射流直径比对液滴尺寸影响不大,而增大喷嘴内长径比可以产生更大的液滴直径。陈杰等^[32]应用时间分辨粒子图像测速(TR-PIV)技术,研究了不同撞击角度和射流压差对凝胶推进剂雾化速度的影响,其结果表明,距撞击点越远,雾化场速度越小且分布越均匀,增大撞击角和射流压差都可以提高雾化质量。

对 2.1、2.2 节进行总结发现,凝胶推进剂的雾化是一个极为复杂过程,目前的雾化实验只能定性分析各因素对雾化效果的影响,还没有统一、定量的物理或经验模型可以对雾化特性进行预测。关于流变参数对雾化的影响,可得出的结论有:(1)水凝胶与水撞击后均形成扇形雾化区,但水凝胶比水更难以雾化;(2)凝胶剂的含量越高,凝胶推进剂粘度越大,雾化越困难;(3)固体颗粒的添加使凝胶推进剂的雾化更加困难。对于喷注雾化参数对雾化的影响,可得出的结论有:(1)增大撞击角和射流速度、减小射流直径及引入扰动均有助于凝胶推进剂的雾化;(2)喷注器的长径比越大,凝胶推进剂的雾化效果越差;(3)自由射流长度对凝胶推进剂雾化的影响不大。

3 凝胶推进剂雾化理论研究

雾化理论研究的目的是在理论层面对雾化现象予以解释,从基本的质量、动量等守恒定律出发,建立理论模型,对雾化特性进行预测。早期的雾化理论研究以牛顿流体为基本研究对象,20 世纪 90 年代以后,随着凝胶推进技术的发展,研究人员以牛顿流体的雾化理论^[8,36]为基础,开始对凝胶推进剂等非牛顿流体的雾化理论进行研究。

对于撞击式雾化及其它大多数雾化形式,流体射流都会在撞击、气流等因素作用下形成液膜,液膜的形成是雾化过程的第一步,也是关键的一步,液膜的形状及破碎等特性直接关系到生成的液丝/液滴的尺寸及分布,因此,液膜特性是雾化理论研究的主要内容。

3.1 液膜形状预测理论

对于双股撞击式喷嘴,射流在较低的速度下撞击时,将在射流所在平面的垂直平面内形成扇形或椭圆形的液膜,其基本形状及相关参数如图 6 所示。其中, ϕ 为角坐标, r 为径坐标, r_e 为液膜边缘的径坐标,下标 e 表示液膜边缘,液膜边缘厚度为 h_e ,任意点处的液膜厚度表示为 h ,射流撞击角度 2θ ,撞击区域的液膜厚度

为 h_i ,撞击区域半径为 r_i ,撞击点到液膜边缘的距离为 r_e , U 为射流速度, ψ 表示液膜边缘当地速度与液膜边缘切线的夹角。在不考虑流体粘性及液膜速度与射流速度相等的假设的基础上, Taylor^[38] 提出了静止反对称波理论(Stationary antisymmetric wave theory),认为在韦伯数(Weber number, We)数大于 1 时,液膜的形状是由有限范围内的静止反对称波所决定的。在 Taylor 研究的基础上, Ibrahim 等^[36] 研究了低/高 We 下的不同雾化机制,低/高 We 数的过渡区域为 500 ~ 2000,在低 We 数下,液膜的破碎是由静止反对称波所控制的,而当 $We > 2000$ 时,液膜的破碎则是由 Kelvin-Helmholtz 波的增长所控制的。Ibrahim 推导了在低 We 数下的液膜形状表达式:

$$\frac{r_e}{RWe} = \frac{\beta e^{\beta(1-\phi/\pi)} \sin^2 \psi}{4(e^\beta - 1)} \quad (1)$$

式中, β 为衰减因子,表示液膜厚度衰减的速度, β 越大,液膜厚度衰减越快,反之则越慢。 β 和 ψ 的值分别由(2)式和(3)式确定:

$$\cos \theta = \left(\frac{e^\beta + 1}{e^\beta - 1} \right) \frac{1}{1 + (\pi/\beta)^2} \quad (2)$$

$$\psi = (\pi/2) \cdot e^{(\ln(2\theta/\pi) \cdot (1-\phi/\pi))} \quad (3)$$

液膜厚度的表达式为:

$$\frac{hr}{R^2} = \frac{\beta e^{\beta(1-\phi/\pi)}}{e^\beta} \quad (4)$$

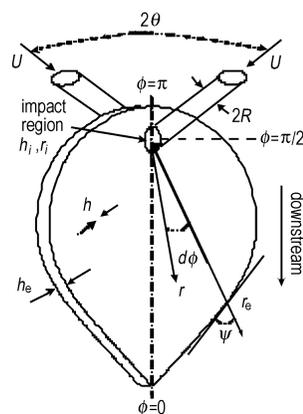


图 6 双股射流撞击形成的液膜形状及参数示意图^[37]

Fig.6 Sketch of liquid sheet formed by doublet jet impingement^[37]

Ryan 等^[39]应用静止反对称波理论对低韦伯数下的层流水射流撞击雾化的分析表明,理论预测的液膜形状、液膜破碎长度、液膜最大长宽比等参数与实验结果非常一致。总体来看,静止反对称波理论可以较好

的对低韦伯数下低粘度流体的液膜特性参数进行预测, 获得了较为广泛的应用^[40-41]。1997年, Chojnacki^[8]首次利用静止反对称波理论对聚羧乙烯和矿物油凝胶的液膜特性进行了分析, 研究表明, 理论预测的液膜远大于实验形成的液膜, 理论与实验之间存在很大误差。这充分说明, 基于无粘流体假设的静止反对称波理论并不适用于凝胶推进剂的雾化这类高粘度流体的雾化问题。为此, Yang等^[40]提出了一种改进理论模型, 该模型考虑了流体的粘性及能量耗散, 预测的粘性流体液膜形状与实验结果较为一致; 基于改进理论, Yang等研究了撞击角度、速度、韦伯数和雷诺数对液膜形状、厚度及速度分布等特性的影响。韩亚伟^[42]研究认为, 静止反对称波理论的重要基础之一是 Naber提出的液膜厚度的假设公式^[36], 因此, 可以通过对理论中相关参数的简单修正, 实现对凝胶推进剂液膜形状的精确预测, 韩亚伟的研究表明, 改进方法在预测其制备的凝胶推进剂模拟液的液膜形状方面非常有效。

3.2 液膜破碎预测理论

液膜破碎预测理论是指对液膜的破碎时间、破碎长度及形成的液丝及液滴的尺寸等相关参数进行预测的理论。其中, 线性稳定理论 (Linear stability analysis)^[43]应用最为广泛。

线性稳定理论经常被用来研究气-液两相界面的增长扰动问题。在射流撞击雾化过程中, 液膜表面会存在两种类型的波: 对称波 (膨胀波) 和反对称波 (弯曲波), 其中, 反对称波的增长率总是高于对称波, 因此, 反对称波控制着液膜的破碎过程。基于反对称波的液膜运动线性稳定理论模型如图7所示。厚度为 $2h$ 的液膜以 U_s 的速度在静止的气体中向右运动, 气体密度为 ρ_g , 液体密度为 ρ_l , 气液密度比 $R_{gl} = \rho_g / \rho_l$; 在气动力、表面张力和粘性力的作用下, 液膜表面产生了扰动波, 波长为 λ , 振幅为 η ; 通过波数可以计算出扰动波的增长率 β_i 。线性稳定理论假设具有最大增长率扰动造成了液膜的破碎, 在扰动波的波峰及波谷处, 液膜可能发生破碎形成液丝, 因此, 液丝的波长是液膜表面扰动波波长的 $1/2$ 。

Dombrowski等^[44]应用线性稳定理论对在气体场中运动的扇形液膜稳定性进行了分析, 考虑粘性力、惯性力、表面张力和气动力作用, 推导出液膜运动过程中扰动波增长率的控制方程 (色散方程) 为:

$$\beta_{i,nd}^2 + \frac{(kh)^2 \beta_{i,nd}}{Re_s} + 2R_{gl}(kh)^2 \left(\frac{1}{We_s} - \frac{1}{kh} \right) = 0 \quad (5)$$

式中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, Re_s 、 We_s 分别为液膜雷诺数和液膜韦伯

数, $\beta_{i,nd}$ 为无量纲扰动波增长率:

$$\beta_{i,nd} = \beta_i h / U_s \quad (6)$$

由于线性稳定理论无法预测液膜的破碎长度, Dombrowski等结合经验公式, 认为当(7)式成立时, 液膜发生破碎:

$$\ln\left(\frac{\eta_{bu}}{\eta_0}\right) = 12 \quad (7)$$

式中, η_{bu} 为液膜发生破碎时的临界波幅。

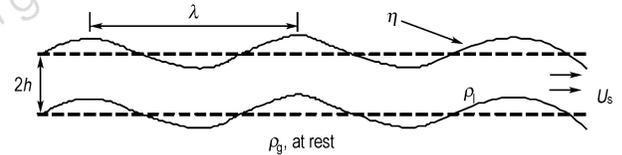


图7 液膜运动的线性稳定理论模型^[43]

Fig.7 Model of moving liquid sheet used in linear stability analysis^[43]

线性稳定理论被广泛的应用于牛顿流体的液膜特性研究^[45-46]。随着凝胶推进剂雾化问题研究的需要, 线性稳定理论开始被发展并应用于凝胶推进剂射流稳定性^[47-49]及液膜特性^[8, 24, 50-55]分析。1997年, Chojnacki^[8, 55]首次基于幂律型本构关系推导了凝胶推进剂的色散方程:

$$\beta_{i,nd}^2 + \frac{n(kh)^2}{Re_s} (\beta_{i,nd})^{2n-1} + 2R_{gl}(kh)^2 \left(\frac{1}{R_{gl} We_s} - \frac{1}{kh} \right) = 0 \quad (8)$$

基于幂律型本构的液膜雷诺数:

$$Re_s = \frac{\rho_l h^n U_s^{2-n}}{K} \quad (9)$$

式中, K 、 n 分别为稠度系数与幂律指数。

Chojnacki在应用式(8)对其制备的凝胶推进剂模拟液的雾化特性进行研究后发现, 线性稳定理论总是过高的预测了液膜表面扰动波的波长, 对此, 他给出了与 Ryan^[39]等及 Ibrahim^[46]等一致的解释: 线性稳定理论只考虑了气动力、粘性力及表面张力对液膜稳定性的影响, 而忽略了射流撞击中最重要的撞击作用, 射流撞击时的高频率不稳定波对液膜稳定性具有重要影响。王枫等^[50]、Yang等^[52]分别基于 Chojnacki 的线性稳定理论模型 (式(8)), 研究了凝胶推进剂物性参数、流变参数等因素对液膜稳定性的影响, 获得了相似的结论: 液膜表面扰动波的增长率随着稠度系数、流动指数和表面张力的增大而减小, 随着液膜速度、液膜厚度和气液密度比的增大而增大; 除液膜厚度增大

会使扰动波波长增大外,扰动波波长的变化规律与扰动波增长率的变化规律相反;线性稳定理论预测的液膜破碎长度与实验结果相一致,但表面波长大于实验值(图 8),这与 Chojnacki 的结论是一致的。Mallory^[24]认为,造成式(8)不能准确预测表面波长主要原因是 Chojnacki 使用的幂律型本构过于简单,不足以精确描述凝胶推进剂的流变特性,因此,他应用 Bird-Carreau(B-C)本构模型描述凝胶推进剂的本构关系,推导了基于 B-C 模型的色散方程,并应用其改进的线性稳定理论及 Huang 等^[56]的半经验公式对最大扰动波波长、液膜破碎长度、液丝及液滴尺寸等参数进行了预测,理论预测值与实验结果比较一致, Mallory 据此认为,其发展的基于 B-C 本构模型的改进非线性稳定理论明显优于 Chojnacki 理论。韩亚伟^[42]认为,线性稳定理论对液膜破碎长度的预测精度与液膜破碎长度的定义方式直接相关,目前的凝胶推进剂雾化研究中使用的仍是牛顿流体液膜破碎的定义方式,为此,他根据凝胶推进剂的雾化特点重新对液膜破碎长度进行了定义,提出用沿液膜轴向从撞击点到液膜表面开始破裂的位置的距离表征液膜的破碎长度,研究发现,使用该种液膜破碎长度定义方式时,理论预测与实验结果吻合较好。

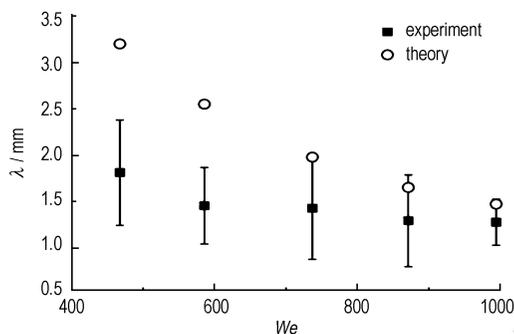


图 8 凝胶推进剂液膜表面波长的理论计算值与实验值的对比^[50]

Fig. 8 Comparison of surface wave length from linear stability analysis and experiment^[50]

对 3.1、3.2 节进行总结,可以得出以下结论:雾化理论研究对于深入揭示凝胶推进剂的雾化机理十分重要,凝胶推进剂雾化理论研究还处于发展阶段,凝胶推进剂的粘度较高,且随着雾化过程的进行不断变化;传统的基于无粘流体假设的静止反对称波理论并不适用于此类问题。线性稳定理论也不能很好地对凝胶推进剂的液膜破碎特性进行预测,未来需要发展考虑射流撞击作用的、更为严密的理论模型。

4 凝胶推进剂雾化数值模拟研究

在工程应用和科学研究中,计算机数值模拟已经逐渐成为解决复杂问题的一种重要手段。与凝胶推进剂雾化实验相比,雾化数值模拟成本低、可重复性好、无安全性问题,可以获得实验无法测量的剪切速率、压力等物理量的变化规律,将仿真结果与实验现象、理论预测相结合,有助于进一步的揭示雾化机理,辅助凝胶推进系统的设计。

从数值模拟的角度看,雾化问题(包括传统液体推进剂雾化及凝胶推进剂雾化)是一个典型的纯三维、自由表面、大变形流动问题。传统网格法在处理雾化问题时,存在着网格扭曲(Lagrange 网格法)^[1]及精确界面追踪(Euler 网格法)^[1]等难题,长期以来,雾化问题的数值模拟研究进展缓慢。近年来,随着计算方法的发展和计算机计算能力的提高,应用 Euler 网格方法为基础的雾化问题数值模拟研究相继见诸报道;同时,研究人员基于新兴的无网格方法,对雾化数值模拟也进行了一定的探索。

4.1 网格法雾化数值模拟

精确界面追踪技术是 Euler 网格法得以应用的核心。从文献结果来看,传统的结构、非结构类网格已不能满足雾化类问题精确界面追踪的需要,网格自适应技术(Adaptive mesh refinement, AMR)^[57]被广泛应用;同时,单一的界面追踪方法,如流体体积(Volume of Fluid, VOF)方法、等值面(Level Set)方法、网格质点(Particle in Cell, PIC)方法等,也不能取得较为理想的界面追踪效果。因此,将多种界面追踪方法相结合、同时发挥各自的优势成为发展的主流,这类方法的典型代表有 MARS(Multi-interface Advection and Reconstruction Solver) & Level Set 方法^[58]、ACLS(Accurate Conservative Levels Set)方法^[59]、CLSVOF(Coupled Level Set & VOF)方法^[60]等。

Euler 网格法在雾化及相关问题中的成功应用有:2008、2012 年,Chihoro 等^[61, 62]基于 CIP 方法(Constrained Interpolation Profile Method)计算对流项,采用 MARS & Level-set 方法追踪气液两相界面,对水射流的断裂及双股水射流撞击雾化进行了数值模拟,模拟得到的射流断裂及液膜的形成过程均与实验较为一致,但液膜的破碎与实验存在一定差距。2010 年,Arinenti 等^[60, 63]采用 AMR 技术和 CLSVOF 方法,同时结合 Lagrange 粒子追踪技术,分别数值模拟了水射流在

低速和高速状态下的撞击雾化过程,得到了液滴尺寸和粒径分布,并与实验结果进行了对比,证明了该方法的有效性;但是,用 Lagrange 粒子表示雾化液滴只能呈球形并作刚性运动,无法描述液滴的进一步的撞击变形、破碎等物理过程。2011年, Dong-Jun Ma 等^[64]采用 VOF 方法和基于八叉树网格的 AMR 技术相结合,对双股牛顿及非牛顿流体射流撞击的一次雾化进行了数值模拟,其中非牛顿流体使用了 Herschel-Bulkley 本构模型,得到了非牛顿流体的两种雾化模式,同时,其研究表明,粘性力和表面张力是导致液膜破碎的主要因素(图9)。2013年, Davide 等^[65]对法国航空航天实验室(ONERA)在一次/二次雾化数值模拟研究的现状进行了总结,对 ONERA 开发的 DYJEAT、SLOSH 代码进行了介绍及算例测试,其中, DYJEAT 是不可压缩并行界面处理程序,采用了 Level-Set/Ghost-Fluid 结构化 Cartesian 网格, SLOSH 是基于非结构网格的低马赫数下可压缩耗散界面处理程序,使用了双流体模型,算例测试结果表明, DYJEAT 及 SLOSH 均能较为有效的捕获二维及三维气液两相流场的运动界面,同时, Davide 认为,单独依靠 Euler 网格进行雾化研究的计算效率很低,与 Lagrange 粒子表示相结合的方法可以更为高效的处理雾化问题,为此, ONERA 正在开发一套名为 CEDRE 的计算程序,以达到实现一次雾化及二次雾化的高精度数值模拟的长期目标。

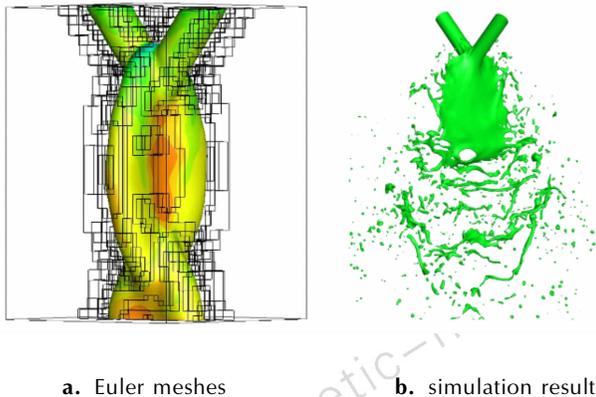


图9 非牛顿射流撞击雾化仿真时使用的 Euler 网格及仿真结果^[64]

Fig.9 Euler meshes used in Non-Newtonian jet impingement simulation and the simulation result^[64]

以上基于 Euler 网格法的雾化问题数值模拟均能在一定程度上反映雾化现象,但是,所使用的数值方法均十分复杂、程序实现困难,计算量巨大、对计算平台要求很高,工程应用难度很大。以 ONERA 进行的液

膜破碎过程仿真为例,计算区域尺寸仅为 3 mm × 6 mm × 3 mm,但使用的网格数高达 33554432,据此估算,若要对典型的大约 10 cm × 5 cm × 5 cm 的雾化区域进行计算,则需要约 10¹²个网格,计算量非常庞大;即使使用 Lagrange 粒子对雾化生成的液滴进行表示,其计算量也不会得到质的减少。

4.2 无网格法雾化数值模拟

为克服传统网格方法的不足、更为有效的仿真雾化问题,强洪夫等^[66-69]探索性地应用光滑粒子流体力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)方法进行了牛顿/非牛顿射流撞击雾化问题的数值模拟。与传统网格方法相比,SPH 方法是一种纯 Lagrange 无网格粒子方法,它使用一系列离散的粒子对计算域进行表征,粒子既代表插值点,又代表物质点,承载着质量、密度、速度等物理量。SPH 方法的纯 Lagrange 粒子属性使其在计算自由表面流动、流体大变形、运动边界等问题时,完全无需追踪界面,具有网格法不可比拟的优势^[70]。

强洪夫等根据凝胶推进剂雾化问题的特点,对 SPH 方法进行了针对性的改进:为克服凝胶推进剂的高粘度对时间步长的限制,发展了三维多时间步隐式 SPH 方法^[71];为提高表面张力计算精度,提出了基于 CSPM 修正的表面张力算法^[72];为有效施加固壁边界条件,提出了基于罚函数方法的新型边界力模型^[73]等。基于以上修正算法,强洪夫等使用的 Navier-Stokes 方程的 SPH 离散形式为:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = m_i \sum_{j=1}^N v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}^C \quad (10)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = - \sum_j m_j \left(\frac{\rho_i + \rho_j}{\rho_i \rho_j} \right) \nabla_i W_{ij}^C + \sum_j \frac{m_j (\eta_i + \eta_j)}{\rho_i \rho_j} \frac{x_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}^C}{x_{ij}^2} v_{ij} + f_s + g + Y_i + \Theta_i \quad (11)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = v_i - \varepsilon \sum_{j=1}^N m_j \frac{v_{ij}}{\rho_{ij}} W_{ij} \quad (12)$$

式(10)~(12)分别为 SPH 离散的连续性方程、动量方程及粒子运动方程,其中, $\frac{d}{dt}$ 为物质导数; i, j 表示粒子编码; ρ, v, p, x, η 分别为流体的密度、速度、压强、位置矢量及表观粘度; $\bar{\rho}_{ij} = \frac{\rho_i + \rho_j}{2}$; N 为粒子 i 支持域内的粒子数; x_{ij} 为粒子 i, j 之间的位置矢量, $r_{ij} = |x_{ij}|$ 为粒子 i 和 j 的距离, $W_{ij} = W(r_{ij}, h)$ 为核函数, h 为定义核函数影响区域的光滑长度, f_s, Y_i 和 Θ_i 分别为表

面张力项、人工粘性项及人工应力项。

强洪夫等^[67]应用 SPH 进行的雾化实践表明,在粒子数为 10^6 量级的情况下,SPH 方法可以有效仿真射流撞击、液膜形成、液膜破碎的典型过程,仿真结果与实验现象基本一致(图 10)。

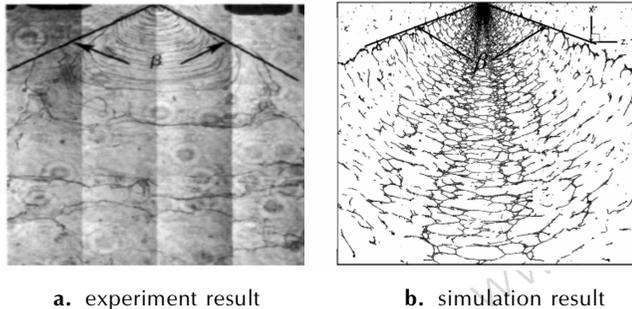


图 10 凝胶推进剂射流撞击实验结果与 SPH 方法仿真结果^[67]

Fig. 10 Experimental and SPH simulation results of gelled propellant jet impingement^[67]

综上所述,作为传统的计算流体力学重要方法的 Euler 网格法,在计算雾化问题时,由复杂三维界面追踪所带来的计算方法复杂、计算量巨大的问题是难以克服的;更有效的处理方法是使用所谓 ELSA (Euler-Lagrange Spray Atomization) 模型^[74],使用 Euler 网格法计算射流撞击形成液膜至液膜破碎形成液滴的过程,而液滴在雾化区的进一步运动则用 Lagrange 粒子表示及追踪,但是,由此带来的 Euler-Lagrange 体系的过渡及其它相关问题进一步增加了算法的复杂性及程序实现难度,同时,ELSA 模型中 Lagrange 粒子描述下的液滴是刚性的,不能发生变形及破碎,因此,在 Euler-Lagrange 网格体系下进行二次雾化的仿真是困难的。SPH 方法为雾化问题的解决提供了一条新的途径,可以相对高效的仿真雾化场的基本特征,但是,SPH 方法作为一种新型算法,算法本身在计算精度、稳定性和计算效率等方面还存在一定问题,此外,SPH 计算中使用的雾化模型考虑因素有限,因此,还需要在 SPH 算法及雾化模型方面进行进一步的发展和完善。

5 总结与展望

本文从实验、理论及数值模拟等方面对凝胶推进剂射流撞击雾化问题进行了分析,三方面的研究现状及发展趋势可概括如下:

(1) 雾化实验方面。雾化实验可以定性地分析各类因素对凝胶推进剂雾化效果的影响,但是,目前还难

以做到对雾化效果的定量描述,实验获得的雾化效果也并不理想,为此,可以在以下三个方面进一步开展工作:首先,根据凝胶推进剂雾化场的特点,建立新的雾化表征方法,凝胶推进剂射流撞击后形成的主要是液丝和大尺寸液滴,因此,如何对液丝及大尺寸液滴构成的雾化场进行表征,是定量描述雾化效果的基础;其次,引入新的测量仪器设备,获得更丰富的实验数据;第三,对现有喷注雾化装置进行改进,研究新的、专用的凝胶推进剂喷注雾化装置,提高雾化效果。

(2) 雾化理论方面。雾化理论上可以在一定程度上对凝胶推进剂射流撞击形成的液膜形状及破碎特性进行预测,但是,相对于实验研究,理论研究更加不成熟,雾化理论模型还不具有普适性,雾化理论研究可以在以下两方面开展工作:首先,从凝胶推进剂的非牛顿本构关系出发,对现有的静止反对称波理论进行改进,更有效的预测低韦伯数下射流撞击形成的液膜形状;其次,将射流撞击作用加入理论模型,建立更为严密的液膜破碎理论,将是对传统的线性稳定理论的一个重大发展。

(3) 雾化数值模拟方面。雾化数值模拟研究还处于起步阶段,基于传统的 Euler 网格及无网格 SPH 新方法的数值模拟可以获得典型的雾化过程,雾化数值模拟可以开展以下工作:首先,结合凝胶推进剂雾化问题的特点,针对性地发展 Euler 网格及 SPH 等无网格方法,对其它新的网格/无网格方法在雾化问题中的应用进行探索;其次,建立 Euler 网格法与无网格粒子法耦合的雾化计算模型,对射流撞击过程应用 Euler 网格描述,而液丝形成、液滴飞溅的过程应用无网格粒子描述,充分发挥 Euler 网格法在连续相计算及无网格粒子法在离散相计算方面的优势,将是凝胶推进剂雾化模拟的一个理想方向。

参考文献:

- [1] 王宁飞,莫红军,樊学忠. 凝胶推进剂的发展及应用[J]. 含能材料, 1998, 6(3): 139-143. WANG Ning-fei, MO Hong-jun, FAN Xue-zhong. A review on development and application of gelled propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1998, 6(3): 139-143.
- [2] 陈炜,张蒙正. 凝胶推进剂的现状与期待[C]//中国化学会第五届全国化学推进剂学术会议中国辽宁大连, 2011.
- [3] Ellison R, Hall T, Moser M. Gelled RP-1 nanophase aluminum propellant[R]. AIAA 2003-4498, 2003.
- [4] Dennis J D, Kubal T D, Campanella O, et al. Rheological characterization of monomethylhydrazine gels[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2013, 29(2): 313-320.
- [5] 强洪夫,夏学礼. 凝胶推进剂管道流动特性影响因素数值分析[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 137-142.

- QIANG Hong-fu, XIA Xue-li. Numerical analysis of factors affecting flow property of gel propellants in round pipes[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 137-142.
- [6] Kampen J von, 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: 77-83.
- [7] 蔡锋娟, 张蒙正. 凝胶推进剂雾化研究现状及问题[J]. 火箭推进, 2010, 36(4): 24-30.
CAI Feng-juan, ZHANG Meng-zheng. Status and problems of gelled propellants atomization research [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2010, 36(4): 24-30.
- [8] Chojnacki K T. Atomization and mixing of impinging non-Newtonian jets [D]. Huntsville: University of Alabama-Huntsville, 1997.
- [9] Chojnacki K T, Feikema D A. Atomization studies of gelled liquids[R]. AIAA 94-2773, 1994.
- [10] Rahimi S, Natan B. Air-blast atomization of gel fuels[R]. AIAA 2001-3276, 2001.
- [11] Jayaprakash N, Chakravarthy S R. Impingement atomization of gelled fuels[R]. AIAA 2003-316, 2003.
- [12] Chernov V, Natan B. Experimental characterization of a pulsatile injection gel spray[R]. AIAA 2005-4479, 2005.
- [13] Kampen J von, Madlener K, Ciezki H K. Characteristic flow and spray properties of gelled fuels with regard to the impinging jet injector type[R]. AIAA 2006-4573, 2006.
- [14] 张蒙正, 陈炜, 杨伟东, 等. 撞击式喷嘴凝胶推进剂雾化及表征[J]. 推进技术, 2009, 30(1): 46-50.
ZHANG Meng-zheng, CHEN Wei, YANG Wei-dong, et al. Atomization and characteristics of gelled propellant with impinging injector[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(1): 46-50.
- [15] 张蒙正, 杨伟东, 王玫. 双股互击式喷嘴凝胶水雾化特性试验[J]. 推进技术, 2008, 29(1): 22-24, 61.
ZHANG Meng-zheng, YANG Wei-dong, WANG Mei. Test of unlike impinging injector atomization characteristic with gelled water[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(1): 22-24, 61.
- [16] James M D, Kubal T D, Son S F, et al. Calibration of an impinging jet injector suitable for liquid and gelled hypergolic propellant [R]. AIAA 2009-4882, 2009.
- [17] Fakhri S, Lee J G, Yetter R A. Atomization and spray characteristics of gelled-propellant simulants formed by two impinging jets [R]. AIAA 2009-5241, 2009.
- [18] Fakhri S, Lee J G. Effect of nozzle geometry on the atomization and spray characteristics of Gelled-Propellant simulants formed by two impinging jets[J]. *Atomization and Sprays*, 2010, 12(20): 1033-1046.
- [19] Madlener K, Ciezki H K. Some aspects of rheological and flow characteristics of gel fuels with regard to propulsion application [R]. AIAA 2009-5240, 2009.
- [20] Negri M, Ciezki H K. Atomization of non-Newtonian fluids with an impinging jet injector influence of viscoelasticity on hindering droplets[R]. AIAA 2010-6821, 2010.
- [21] Lee I, Koo J. Break-up characteristics of gelled propellant simulants with various gelling agent contents[J]. *Journal of Thermal Science*, 2010, 19(6): 545-552.
- [22] Mallory J, Sojka P. Dynamics of sheets formed using gelled propellant impinging jets[R]. AIAA 2010-7141, 2010.
- [23] Mallory J A, Sojka P E. A novel experimental facility for impinging jet injector flow studies[R]. AIAA 2010-6809, 2010.
- [24] Mallory J A. Jet impingement and primary atomization of non-newtonian liquids [D]. West Lafayette: Purdue University, 2012.
- [25] Jung S, Hoath S D, Martin G D, et al. Experimental study of atomization patterns produced by the oblique collision of two viscoelastic liquid jets [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2011, 166(5): 297-306.
- [26] 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): 1272-1285.
- [27] 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.
- [28] Fu Q, Yang L, Zhuang F. Effects of orifice geometry on spray characteristics of impinging jet injectors for gelled propellants [R]. AIAA 2013-3704, 2013.
- [29] Fu Q, Duan R, Cui K, et al. Spray of gelled propellants from an impinging-jet injector under different temperatures[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014.
- [30] Padwal M B, Mishra D P. Synthesis of Jet A1 gel fuel and its characterization for propulsion applications[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 106: 359-365.
- [31] Rodrigues N S, Sojka P E. A parametric investigation of gelled propellant spray characteristics utilizing impinging jet geometry [R]. AIAA 2014-1184, 2014.
- [32] 陈杰, 封锋, 马虎, 等. 基于 piv 的凝胶模拟液撞击雾化速度场实验研究[J]. 推进技术, 2014, 35(4): 565-569.
CHEN Jie, FENG Feng, MA Hu, et al. Experimental study on impinging velocimetry of gel simulants based on PIV[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(4): 565-569.
- [33] 陈杰. 过氧化氢凝胶雾化及二次补燃特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [34] Rahimi S, Natan B. Atomization characteristics of gel fuels[R]. AIAA 98-3830, 1998.
- [35] Rapp D C, L R. Characterization of aluminum/RP-1 gel propellant properties[R]. AIAA-88-2821, 1988.
- [36] Ibrahim E A, Przekwas A J. Impinging jets atomization[J]. *Physics of Fluid*, 1991, 3(12): 2981-2987.
- [37] Ashgriz N. Handbook of atomization and sprays: Theory and applications[M]. New York: Springer, 2011.
- [38] Taylor G. Formation of thin flat sheets of water[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series a, Mathematical and Physical Sciences*, 1960, 259(1296): 1-17.
- [39] 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.
- [40] Yang L, Zhao F, Fu Q, et al. Liquid sheet formed by impingement of two viscous jets[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(4): 1016-1026.
- [41] Inamura T, Shiota M. Effect of velocity profile of impinging jets on sheet characteristics formed by impingement of two round liquid jets[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 60: 149-160.
- [42] 韩亚伟. 凝胶推进剂撞击式雾化的实验与 sph 数值模拟方法研究 [D]. 西安: 第二炮兵工程大学, 2014.
HAN Ya-Wei. Research on atomization of gelled-propellants

- formed by the impinging injector based on experiment and smoothed particle hydrodynamics method[D]. Xi'an: The Second Artillery Engineering University, 2014.
- [43] Squire H B. Investigation of the instability of a moving liquid film[J]. *British Journal of Applied Physics*, 1953,4: 167-169.
- [44] Dombrowski N, Johns W R. The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets[J]. *Chemical Engineering Science*, 1963,18(3): 203-214.
- [45] Tz B H E, Madlener K, Ciezki H K. Breakup characteristics of a newtonian liquid sheet formed by a doublet impinging jet injector[R]. AIAA 2007-5694, 2007.
- [46] Ibrahim E A. Comment on atomization characteristics of impinging liquid jets[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009,25(6): 1361-1362.
- [47] Chang Q, Zhang M, Bai F, et al. Instability analysis of a power law liquid jet[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2013,198: 10-17.
- [48] Yang L, Qu Y, Fu Q, et al. Linear stability analysis of a slightly viscoelastic liquid jet[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013,28(1): 249-256.
- [49] Yang L, Tong M, Fu Q. Linear stability analysis of a three-dimensional viscoelastic liquid jet surrounded by a swirling air stream[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2013,191: 1-13.
- [50] 王枫, 富庆飞, 杨立军. 幂律流体液膜破裂的线性稳定性分析[J]. 航空动力学报, 2012,27(4): 876-881.
WANG Feng, FU Qing-fei, YANG Li-jun. Linear instability analysis of a power-law liquid sheet[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012,27(4): 876-881.
- [51] Yang L, Xu B, Fu Q. Linear instability analysis of planar non-Newtonian liquid sheets in two gas streams of unequal velocities[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2012,167-168: 50-58.
- [52] 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.
- [53] Yang L J, Qu Y Y, Fu Q F. Linear stability analysis of a Non-Newtonian liquid sheet[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010,26(6): 1212-1224.
- [54] Alleborn N, Raszillier N, Durst F. Linear stability of non-Newtonian annular liquid sheets[J]. *Acta Mechanica*, 1999,137(1): 33-42.
- [55] Chojnacki K T, Feikema D A. Study of non-newtonian liquid sheet formed by impinging jets[R]. AIAA 97-3335, 1997.
- [56] Huang J. The break-up of axisymmetric liquid sheets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970,43(2): 305-319.
- [57] Fuster D, Bagué A, Boeck T, et al. Simulation of primary atomization with an octree adaptive mesh refinement and VOF method[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009,35(6): 550-565.
- [58] Shinjo J, Umemura A. Simulation of liquid jet primary breakup: Dynamics of ligament and droplet formation[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010,36(7): 513-532.
- [59] Van Poppel B P, Desjardins O, Daily J W. A ghost fluid, level set approach for modeling electrohydrodynamic atomization[R]. AIAA 2010-372, 2010.
- [60] Arienti M, Li X, Soteriou M C, et al. Coupled level-set/volume-of-fluid method for the simulation in propulsion device injectors[R]. AIAA 2010-7136, 2010.
- [61] Inoue C, Watanabe T, Himeno T. Study on atomization process of liquid sheet formed by impinging jets[R]. AIAA 2008-4847, 2008.
- [62] Inoue C, Watanabe T, Himeno T. Atomization and flow characteristics of liquid sheet produced by jet impingement[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2012,28(5): 1060-1070.
- [63] Li X, Arienti M, Soteriou M C. Towards an efficient, High-Fidelity methodology for liquid jet atomization computations[R]. AIAA 2010-210, 2010.
- [64] Ma D J, Chen X D, Khare P, et al. Atomization patterns and breakup characteristics of liquid sheets formed by two impinging jets[R]. AIAA 2011-97, 2011.
- [65] Zuzio D, Estivaleres J, Villedieu P, et al. Numerical simulation of primary and secondary atomization[J]. *Comptes Rendus Mecanique*, 2013,341(1-2): 15.
- [66] 强洪夫, 刘虎, 陈福振, 等. 基于 SPH 方法的射流撞击仿真[J]. 推进技术, 2012,33(3): 424-429.
QIANG Hong-fu, LIU Hu, CHEN Fu-zhen, et al. Simulation on jet impingement based on SPH method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012,33(3): 424-429.
- [67] 强洪夫, 刘虎, 韩亚伟, 等. 基于 SPH 方法的凝胶推进剂一次雾化仿真研究[J]. 固体火箭技术, 2013,36(1): 61-66.
QIANG Hong-fu, LIU Hu, HAN Ya-wei, et al. Simulation research on first atomization characteristics of gelled propellant based on SPH method[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013,36(1): 61-66.
- [68] 韩亚伟, 强洪夫, 刘虎. 双股液体射流撞击雾化的 SPH 方法数值模拟[J]. 工程力学, 2013,30(3): 17-23.
HAN Ya-wei, QIANG Hong-fu, LIU Hu. Numerical simulation of two liquid impinging jets with SPH method[J]. *Engineering Mechanics*, 2013,30(3): 17-23.
- [69] 强洪夫, 韩亚伟, 王广, 等. 幂律型流体雾化 SPH 方法数值分析[J]. 推进技术, 2013,34(2): 240-247.
QIANG Hong-fu, HAN Ya-wei, WANG Guang, et al. Numerical analysis of atomization process of liquid with power law model based on SPH method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013,34(2): 240-247.
- [70] Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics and its diverse applications[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012,44: 323-346.
- [71] HAN Y, QIANG H, HUANG Q, et al. Improved Implicit SPH Method for simulating free surface flows of power law fluids[J]. *SCIENCE CHINA-Technological Sciences*, 2013,56(10): 2480-2490.
- [72] 强洪夫, 陈福振, 高巍然. 修正表面张力算法的 SPH 方法及其实现[J]. 计算物理, 2011,28(3): 375-384.
QIANG Hong-fu, CHEN Fu-zhen, GAO Wei-ran. Smoothed particle hydrodynamics methodology with modified algorithm for surface tension and its implementation[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2011,28(3): 375-384.
- [73] 强洪夫, 韩亚伟, 王坤鹏, 等. 基于罚函数 SPH 新方法的水模拟充型过程的数值分析[J]. 工程力学, 2011,28(1): 245-250.
QIANG Hong-fu, HAN Yan-wei, WANG Kun-peng, et al. Numerical simulation of water filling process based on new method of penalty function SPH[J]. *Engineering Mechanics*, 2011,28(1): 245-250.
- [74] Hoyas S, Gil A, Margot X, et al. Evaluation of the Eulerian-Lagrangian Spray Atomization (ELSA) model in spray simulations: 2D cases[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011,57(7-8): 1686.

Review on Jet Impingement Atomization of Gelled Propellant

LIU Hu, QIANG Hong-fu, WANG Guang

(Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: As a kind of new rocket propellant, gelled propellant is thought to integrate the advantages of traditional liquid propellant and solid propellant. Gelled propellant's special non-Newtonian rheological characteristics make it difficult to be atomized and atomization is one of the key problems of gel propulsion technology. Jet impingement atomization was the mainly used atomization method. The statuses of research on experiment, theory and simulation of gelled propellant jet impingement atomization were reviewed. From the discussion, the following conclusions could be drawn: firstly, in aspect of atomization experiment, with the analysis of experiment obtained atomization data, the influences of rheology and impinging parameters on atomization could be got, but hardly any quantitative result could be concluded. Secondly, in aspect of atomization theory, the liquid sheet characteristics, such as liquid sheet shape, liquid sheet breakup length, etc., could be predicted by the stationary antisymmetric wave theory and the linear stable theory, but the accuracy of the prediction was not so high and the atomization theory should be further improved. Thirdly, in aspect of atomization simulation, the main developing processes of jet impinging atomization could be simulated with both traditional mesh based methods and newly developed mesh free methods, but the simulation results was fairly rough and the atomization simulation was still on in a fledging period. In a word, the mechanism of the gelled propellant atomization was still beyond being fully understood, future work could be carried in the following aspects: to develop a quantitative gelled propellant atomization characterizing method, to develop a new non-Newtonian rheological based and impingement included atomization theory, to improve the numerical simulation methods according to the characteristics of jet impingement atomization of gelled propellant, etc.

Key words: gelled propellant; jet impingement atomization; atomization experiment; atomization theory; atomization simulation

CLC number: V43; TJ55; O35

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.07.017



读者·作者·编者

《含能材料》高效毁伤弹药专栏征稿

高效毁伤弹药以“利用最小化成本获得最大化效果”为目标,对含能材料的性能和能量提出了更高的要求。为进一步促进高效毁伤弹药及其技术的研究,本刊将于2015年增设高效毁伤弹药专栏,内容涉及(1)传统含能材料的优化和改进以及先进含能材料的开发和应用,包括:传统含能材料合成、制造、处理和应用的新方法与新技术,新的CHON含能材料的开发和应用,金属化炸药,非传统概念炸药(如燃料空气炸药、温压炸药),高能量密度材料;(2)含能材料能量的控制输出研究,包括:能量输出增强(如组合装药),能量输出聚焦/定向,能量输出模式可控(如多模装药),能量输出范围可控(如低附带毁伤炸药)。欢迎广大学者投稿,来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部