

## 凝胶推进剂模拟液静电雾化行为规律研究

吴德志<sup>1</sup>, 孙瑜<sup>1</sup>, 王勇<sup>2</sup>, 罗毅辉<sup>1</sup>, 赵扬<sup>1</sup>, 陈沁楠<sup>1</sup>, 王凌云<sup>1</sup>, 洪流<sup>2</sup>, 孙道恒<sup>1</sup>

(1. 厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361102;

2. 西安航天动力研究所, 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 针对凝胶推进剂雾化困难的问题, 引入静电喷射技术雾化凝胶推进剂。以水凝胶模拟液为介质, 探究静电雾化技术的可行性及试验条件, 当收集距离 2~5 cm、供液速率 10~30  $\mu\text{L}/\text{h}$  时, 凝胶模拟液可实现稳定雾化, 收集液滴直径小于 100  $\mu\text{m}$ , 散射角分布在  $8^\circ\sim 36^\circ$  之间, 收集液滴直径和散射角均随收集距离的增大和针管直径的减小而减小; 同样条件下, 凝胶粘度越小, 散射角和雾化液滴直径越小。在此基础上, 针对单针管推力小的问题, 分析使用多针管喷头进行凝胶推进剂静电雾化的可行性及其雾化区域分布, 结果表明 2 号凝胶模拟液用于多喷头雾化可得到良好的雾化区域分布, 适用于凝胶推进系统之中。

**关键词:** 凝胶推进剂; 静电雾化; 雾化液滴; 散射角

中图分类号: V439-34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374(2018)03-0054-08

## Study on behavior rules of electrostatic atomization for gelled propellant simulant

WU Dezhi<sup>1</sup>, SUN Yu<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, LUO Yihui<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>1</sup>, CHEN Qinnan<sup>1</sup>,  
WANG Lingyun<sup>1</sup>, HONG Liu<sup>2</sup>, SUN Daoheng<sup>1</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

2. Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an Aerospace  
Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In view of the atomization difficulty of gelled propellant, electrostatic injection technology was introduced to atomize gelled propellant. The hydrogel simulant was taken as a medium to investigate the feasibility and experimental conditions of the electrostatic atomization technology. When the collection distance is 2~5 cm and the liquid flow rate is and 10~30  $\mu\text{L}/\text{h}$ , the gelled simulant can achieve steady atomization. The diameter of collected droplets is less than 100  $\mu\text{m}$  and the jet-spread angle distribution is  $8^\circ\sim 36^\circ$ . Meanwhile, the diameter of atomization droplets and the jet-spread angle decrease with the increase of collection distance and the decrease of nozzle diameter. Under the same conditions, the lower the viscosity of the gel is, the smaller the jet-spread angle and the diameter of atomization droplet become. On this basis, the feasibility of multi-nozzle structure to atomize the gelled propellant and the dis-

收稿日期: 2018-04-12; 修回日期: 2018-05-06

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(61427040203162704004)

作者简介: 吴德志(1977—), 男, 教授, 研究领域为微纳制造

tribution of atomization area were analyzed for the problem of small thrust from a single nozzle. The results show that the No. 2 gelled simulant used in the multi-nozzle structure can obtain a good distribution of atomization area, which is more suitable for gelled propulsion system.

**Keywords:** gelled propellant; electrostatic atomization; atomization droplet; jet-spread angle

## 0 引言

凝胶推进剂具有运输安全、可长期贮存、使用维护方便和推力可控等特点,兼具固体推进剂和液体推进剂的主要优点,是一种航空航天推进系统的新型推进剂<sup>[1]</sup>。凝胶推进剂是指在液体推进剂中添加定量的胶凝剂,从而改变其流变特性成为类似固体的分散体结构<sup>[2]</sup>,通常表现出剪切变稀行为和触变行为。目前研究主要包括流变特性、雾化特性、燃烧特性3方面,其中雾化特性是连接流变特性和燃烧特性的纽带,是目前研究的重点,获得较为广泛的研究<sup>[3-4]</sup>。

雾化效果沿用液体推进剂的表征方法,采用喷雾角、液膜破碎长度、液滴的索太尔平均直径(Sauter mean diameter, SMD)等参数进行表征,包含实验测试与数值模拟两种方式。张蒙正等<sup>[5-6]</sup>使用水凝胶模拟液为介质,研究撞击角度、撞击速度、射流波动及在射流中增加气体扰动对双组元系统雾化的影响,结果表明增大撞击角度和射流速度、减小射流直径有助于凝胶推进剂的雾化,增加气体扰动或射流波动可以进一步促进其雾化。Fakhri等<sup>[7]</sup>研究凝胶水溶液和非凝胶水溶液在不同入口形状及长径比条件下的双股射流撞击雾化效果,结果表明凝胶水溶液射流撞击形成的液膜更稳定,液滴尺寸及分布空间更小;入口形状对雾化效果影响不大,长径比越大,则索太尔平均直径越大,长径比越小,则射流会产生较强的表面波动,影响射流撞击的精度。Fu等<sup>[8]</sup>研究了圆形、椭圆形和方形喷口条件下双股射流撞击雾化的效果,发现在横截面积相同条件下,方形喷口的射流在轴向转换特性行为下会产生波动,使液膜的破碎长度小于圆形喷口;椭圆形喷口液膜破碎长度时大时小,射流的稳定性不如圆形喷口,非圆形喷口引起的射流波动有利于增强射流撞击雾化效果,但是加工难度大,不利于工程应用。Dong - Jun Ma等<sup>[9]</sup>结合流体体积(volume of fluid, VOF)方法和基于八叉树网格的AMR技术对

牛顿及非牛顿流体双股射流撞击的一次雾化进行数值模拟,得到非牛顿流体两种雾化模式,并发现引起液膜破碎的主要原因是流体的粘性力和表面张力。强洪夫等<sup>[10-12]</sup>为克服凝胶推进剂的高粘度对时间步长的限制、提高表面张力计算精度并有效施加固壁边界条件,发展了三维多时间步隐式光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)方法,并且提出基于CSPM修正的表面张力算法和基于罚函数方法的新型边界力模型,可以模拟射流撞击、液膜形成、液膜破碎的过程,结果与实验现象基本一致。

双组元凝胶推进剂传统雾化方式是通过加工特定的喷头结构或者双股高速射流的撞击来实现雾化,这样的雾化方式需要高压泵和阀等部件,增大了整体结构的复杂性和体积,雾化液滴直径通常大于100  $\mu\text{m}$ ,限制了燃烧效率的提高。

静电雾化技术对液体强制荷电并引入外加电场,通过电场力的作用克服液体表面张力和粘性力,将液体拉伸直至破碎成为微小雾滴,已可用于液体燃料的雾化燃烧<sup>[13-14]</sup>及高粘度溶液雾化当中<sup>[15]</sup>。本文研究凝胶推进剂静电雾化的可行性及行为规律,包括溶液特性、针管直径、收集距离等参数对雾滴粒径分布及散射角分布的影响,并藉此分析多针管喷头静电雾化并获得理想雾化效果的可行性。

## 1 实验装置及测量方法

### 1.1 凝胶模拟液流变特性

基于安全考虑,参照实际使用的甲基胍和四氧化二氮凝胶的流变特性,采用3种不同流变特性的水凝胶模拟溶液进行实验研究。室温条件下,3种水凝胶模拟液的剪切粘度-剪切速率关系如图1所示,显然3组溶液都具备良好的剪切变稀行为,相对而言,3号水凝胶模拟液初始粘度最高且剪切变稀行为更显著。

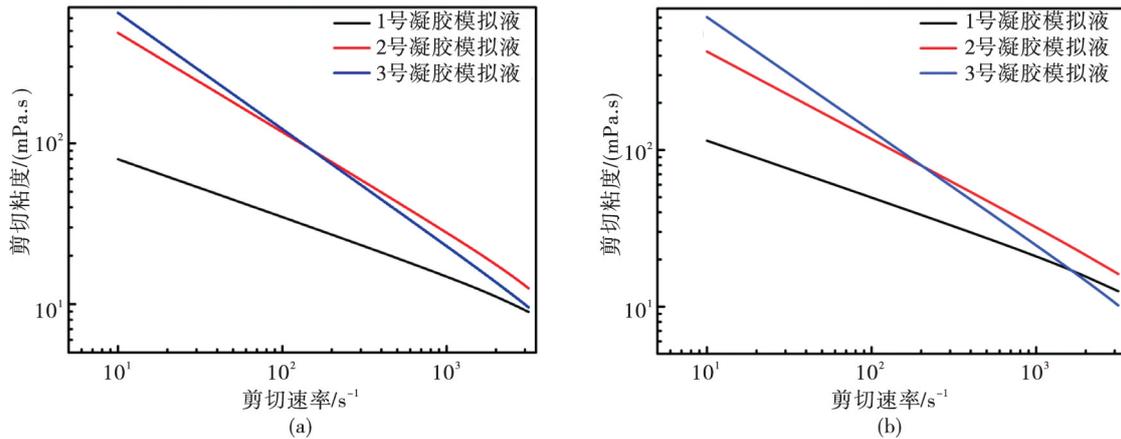


图1 3种不同凝胶模拟液流变特性曲线: (a) T = 0 h; (b) T = 20 h

Fig. 1 Rheological characteristic curves of three different gelled simulants

1.2 实验装置及研究对象

静电雾化实验装置如图2所示,注射泵提供持续稳定推力使凝胶模拟液从注射器金属针管尖端缓慢流出,在注射器金属针管上施加临界电压,接收板接地,针管尖端和接收板之间形成强电场,针管尖端流出液滴在电场力作用下形成稳定泰勒锥,并克服表面张力和粘性力被拉伸破碎成带电小液滴,并在电场和带电粒子相互作用下向收集板运动,最终粘附在收集板上。在凝胶推进剂静电雾化的过程中,通过CCD相机观测针尖液体在电场力作用下拉伸破碎成较小液滴的过程。

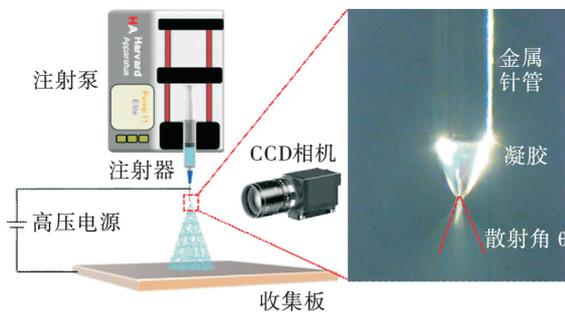


图2 静电雾化示意图

Fig. 2 Schematic of electrostatic atomization

凝胶模拟液静电雾化的雾滴粒径分布和散射角对其雾化程度及双组元射流撞击实验的可行性具有重要指导作用。考虑到实验设备的限制以及具体的需求,分析雾化液滴粒径和散射角在不同实验条件下的变化规律时,使用载玻片收集雾化液

滴,通过光学显微镜分析测定收集到的雾滴直径来表征其雾滴粒径的变化规律。每组选取一百滴雾滴样品,使用光学显微镜及配套软件测量雾滴直径,显然收集雾滴直径远大于实际雾滴直径,其变化规律可以间接体现实际雾滴粒径变化规律。根据凝胶模拟液静电雾化的图像可知,散射角由两部分组成,上端为锥形,下端为弧形,锥型部分的角度小于弧形部分角度,锥型部分的分析结果可代表实际雾化角的变化规律,所以本文使用的散射角都是指锥型部分,数值可用电子显微镜配套软件测定。试验选择22G、23G及25G三种针管(参数见表1)分析凝胶模拟液的静电雾化粒径分布和散射角变化规律。

表1 针管规格及其内外径

Tab. 1 Nozzle specification and its inner and outer diameters

针管型号	内径/mm	外径/mm
22G	0.41	0.70
23G	0.33	0.63
25G	0.26	0.51

2 实验结果及分析

2.1 凝胶推进剂静电雾化实验条件

搭建静电雾化实验装置,分别在注射器中填充1、2、3号凝胶模拟液,调整供液速率、针管规格、施加电压和收集距离研究其静电雾化的可行性,经过多次实验测试,只有1号模拟液与2号模拟液在一

定实验条件下实现稳定静电喷雾,3号凝胶模拟液由于粘度较大会被拉伸成为丝带状,不能稳定破碎成为更小液滴。所以将1号模拟液与2号模拟液作为后续实验溶液,在稳定静电雾化条件下1号与2号模拟液总体的供液速率在10~30 μL/h。采用22 G针管,当收集距离从2 cm增加到5 cm时,1号

凝胶模拟液雾化临界电压从6.02 kV增加到6.93 kV,2号凝胶模拟液临界电压从6.21 kV增加到7.20 kV,如图3所示。而且针管直径越小,雾化临界电压越低,这主要是由于针管喷嘴减小导致电场增强。

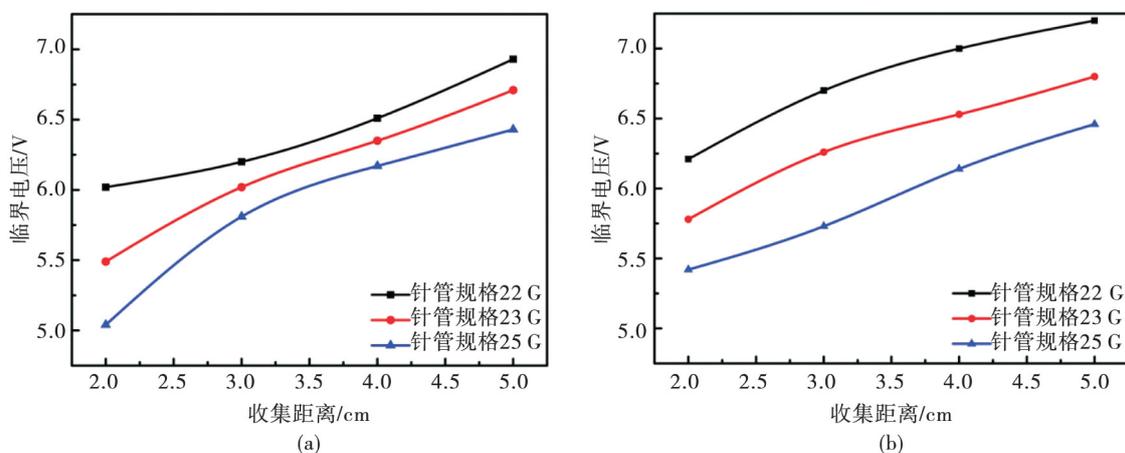


图3 临界电压与收集距离关系曲线

Fig. 3 Relationship between critical voltage and collection distance

## 2.2 收集雾化液滴粒径分布

图4展示了不同针管规格、收集距离条件下1号模拟液雾化液滴粒径分布及变化规律情况。可以看出,针管规格为22 G,收集距离分别为2 cm、3 cm、4 cm及5 cm时,收集液滴平均直径分别为42.07 μm、38.36 μm、35.94 μm及26.81 μm,收集液滴的平均直径随收集距离的增大而减小,同时粒径分布也更为集中。这主要是由于增大收集距离使液滴在空中飞行时间增长,有利于液滴在空中完全破碎。针管规格分别为23 G和25 G时雾化液滴粒径分布变化规律也是一致的,并且在同样条件下,收集液滴直径随管内径的减小而减小,这是因为施加同样的电压,针管直径越小,液滴所带电荷密度越大,容易达到Rayleigh极限,破碎更完全,使雾化液滴粒径更小,尺寸分布更集中。

Rayleigh极限通常表示为

$$Q_{\max} = 4\pi\epsilon_0 \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} Ed^2$$

式中 $Q$ 、 $E$ 、 $d$ 和 $\epsilon_r$ 分别为电荷量、电场强度、液滴直径和相对介电常数。当液滴的带电量达到Rayleigh极限时,液滴将会破碎成更小的带电液滴<sup>[16]</sup>,同时

可以发现Rayleigh极限与液滴直径的平方成正比关系,即在同样的电荷密度条件下,液滴的直径越小,越容易达到Rayleigh极限。

从图5可以看出,2号凝胶模拟液在不同收集距离和针管规格条件下静电雾化雾滴粒径柱状分布图和相应的正态分布拟合曲线与1号模拟液的实验结果相似,当针管规格为22 G,收集距离分别为2 cm、3 cm、4 cm及5 cm时,收集液滴平均直径分别为67.56 μm、61.10 μm、51.75 μm及39.84 μm。

可见,通过调整针管规格和收集距离等可以调控凝胶模拟液的静电雾化雾滴直径分布。同样条件下,1号凝胶模拟液的静电喷雾液滴直径小于2号模拟液,液滴直径分布更集中均匀。1号凝胶模拟液所含有的胶凝剂要小于2号凝胶模拟液,所以1号凝胶模拟液的电导率小于2号凝胶模拟液,结合Rayleigh极限公式可知,1号凝胶模拟液更容易达到Rayleigh极限,即1号凝胶模拟液在电场作用下破碎的更为彻底。但雾化液滴粒径过小会导致其在腔体内的分布不均匀,缩小燃烧稳定性的范围,甚至会使燃烧效率降低<sup>[17]</sup>,所以具备2号凝胶模拟液流变特性的燃料凝胶和氧化剂凝胶在点火试验中会具有更好的性能表现。

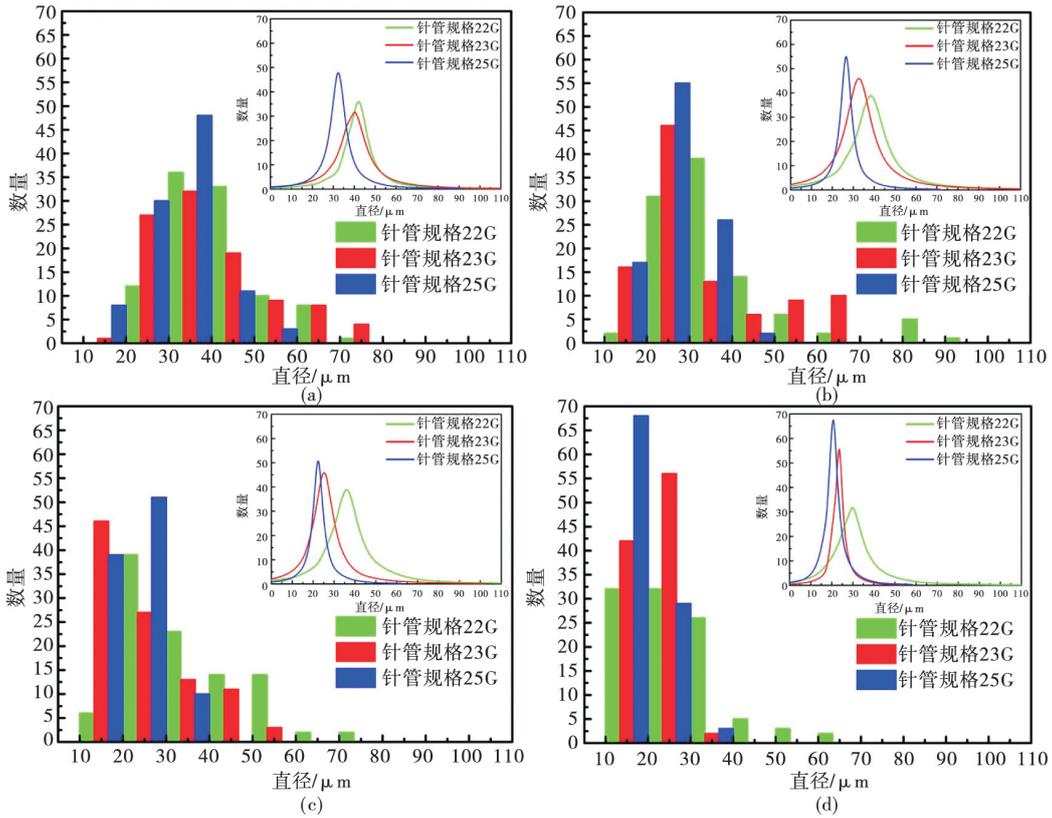


图4 1号凝胶模拟液在不同收集距离时静电雾化液滴直径分布

Fig. 4 Diameter distribution of electrostatic atomization droplet of No. 1 gelled simulant at different collection distances

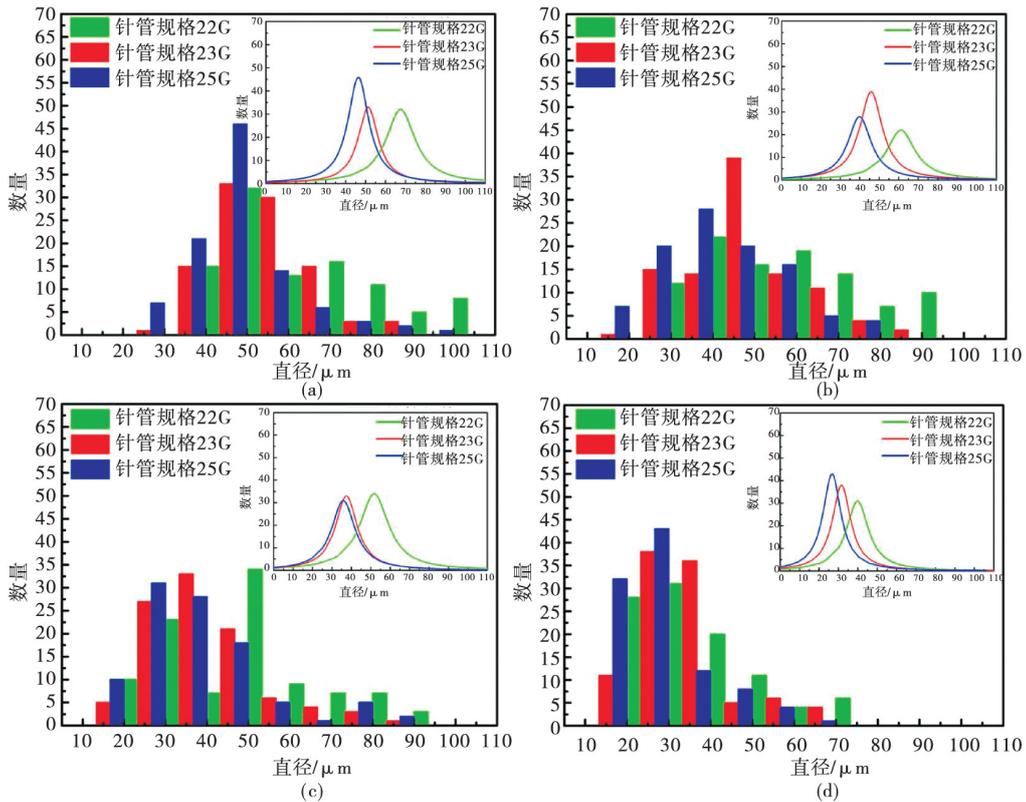


图5 2号凝胶模拟液在不同收集距离时静电雾化液滴直径分布

Fig. 5 Diameter distribution of electrostatic atomization droplet of No. 2 gelled simulant at different collection distances

2.3 雾化散射角分布

1号凝胶模拟液和2号凝胶模拟液在不同针管规格和收集距离条件下的散射角分布如图6所示。当针管规格为22G,收集距离为2cm,3cm,4cm及5cm时,1号凝胶模拟液的最大散射角分别为22.46°,18.6°,14.65°及11.81°,即随着收集距离增大,散射角逐渐减小。这是因为收集距离增大,电极间电场逐渐减弱,荷电量减少,带电液滴被拉伸

破碎的力减小,引起散射角的减小。同时可以看到,散射角也随着针管直径减小而减小,这是因为针管直径越小,稳定静电喷雾时的供液速率和临界电压越小,破碎液滴带电量减小使带电液滴之间排斥力减弱,导致喷雾角的减小。对于2号凝胶模拟液,当针管规格为22G,收集距离为2cm,3cm,4cm及5cm时,最小散射角分别为27.54°,23.21°,18.77°及15.35°,其相应规律和1号凝胶模拟液相似。

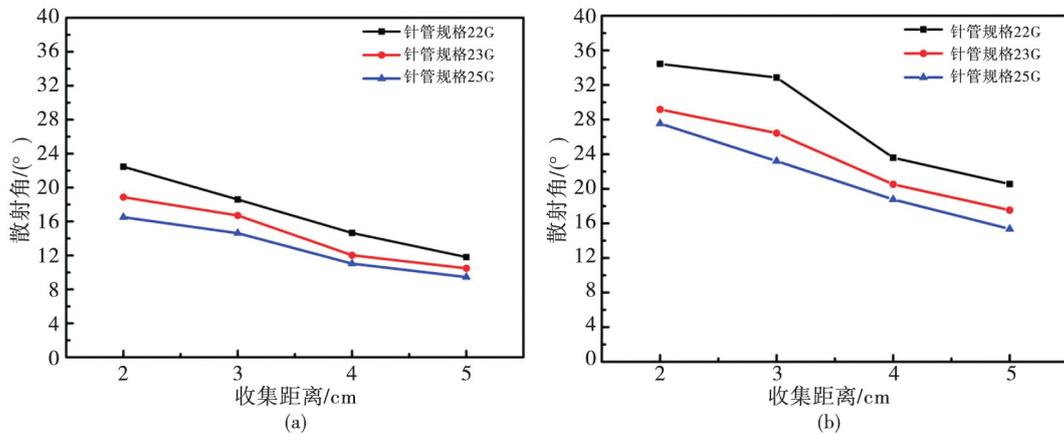


图6 1号凝胶模拟液与2号凝胶模拟液的散射角分布  
Fig. 6 Jet-spread angle distribution of No. 1 gelled stimulant and No. 2 gelled simulant

2.4 多针管喷头静电雾化分析

单针管结构流量和推力量级过小,不利于推进系统的使用,必须开发多喷头结构,其静电雾化结果可以辅助分析多喷头结构的可行性。多喷头结构中各个针管间距均为1cm<sup>[18-19]</sup>。每个针管静电喷雾都有自己的雾化区域,各雾化区域之间必须具备一定的相交性,才能够保证雾化液滴能够覆盖到整个区域。

以7针管喷头结构为例,其结构示意图如图7(a)所示,雾化区域临界分布如图7(b)所示,圆心间距即为针管间距设置为1cm,雾化区域临界分布是指各针管雾化区域刚刚能够覆盖整个平面的状态,这种状态更有利于双组元系统中燃烧剂和氧化剂的碰撞燃烧,此时对应的雾化角即为临界雾化角。在实际多针管喷头静电雾化过程中,各针管间的排斥作用会使射流产生偏移,即雾化区域的圆心不是针管的垂直映射,雾化区域圆心之间的距离实际大于1cm,同时在定义单针管静电喷雾雾化角的时候,选用的是锥型部分作为分析对象,实际的雾

化区域要大于理论分析的雾化区域,在这两种条件相互弥补下,可认为此处雾化区域临界分布的情况是符合真实多针管喷头静电雾化过程的。

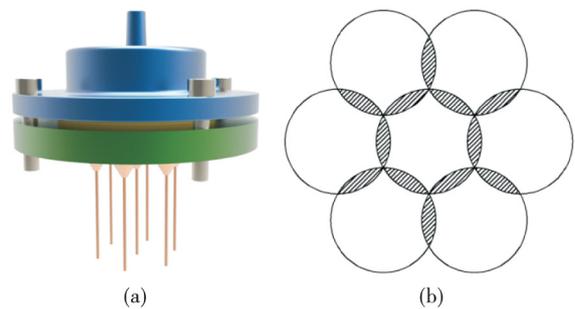


图7 7针管喷头结构及其静电雾化区域临界分布  
Fig. 7 Seven-nozzle structure and its critical distribution in electrostatic atomization region

根据7针管结构雾化区域临界分布图和针管到收集板之间的距离可以计算出不同收集距离下的临界雾化角分布,如图8所示,收集距离分别为2cm,3cm,4cm及5cm时,相应的临界雾化角为33.557°,22.192°,16.598°及13.261°。散射角和临

界雾化角均随收集距离的增大而减小,但实际应用中收集距离不宜过大,否则会增大燃烧室长度,加大燃烧室设计难度,同时收集距离增大,雾滴的运动速度减小,不利于两种溶液雾化液滴的接触碰撞。

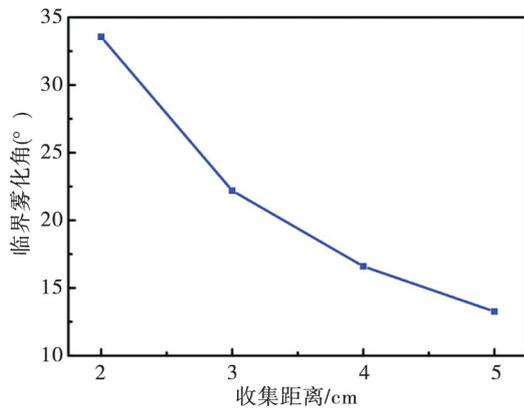


图8 临界雾化角分布

Fig. 8 Distribution of critical jet-spread angle

综合分析两种凝胶模拟液在不同收集距离下静电雾化的雾化角分布可知,一号凝胶模拟液在不同收集距离条件下均不能达到雾化区域临界分布条件,二号凝胶模拟液在部分条件下能够达到雾化区域临界分布条件,当针管规格为22G,收集距离为2 cm,3 cm,4 cm及5 cm时,其最大雾化角为34.44°,32.86°,23.6°及20.55°,均大于对应临界雾化角,即可用于多针管结构的静电雾化,同时考虑到凝胶模拟液在不同实验条件下进行静电雾化的粒径分布,可得结论,收集距离为3~5 cm,针管规格为22G是使用多针管喷头结构进行凝胶推进剂静电喷雾的合适条件,能够得到较好的雾化区域分布。

### 3 结论

凝胶推进剂兼具固体推进剂和液体推进剂的主要优势,在未来航空航天推进系统中具有很大的应用潜力,但是应用传统雾化方式雾化较为困难,限制了其使用。本文研究使用静电雾化技术对凝胶推进剂模拟液进行雾化的实验条件及雾滴粒径和散射角分布规律,并分析多喷头结构雾化区域的分布,得到以下结论:

1) 一号凝胶模拟液和二号凝胶模拟液能够实现稳定的静电喷雾状态,当收集距离为2~5 cm,供

液速度10~30  $\mu\text{L}/\text{h}$ ,针管内径0.26~0.41 mm时,临界电压为5~7.5 kV。

2) 凝胶推进剂静电雾化液滴直径小于100  $\mu\text{m}$ ,随收集距离的增大和针管直径的减小而减小,并且分布更为集中;散射角分布在 $8^\circ\sim 36^\circ$ 之间,随收集距离的增大和直径的减小而减小。同样条件下,1号凝胶模拟液的雾化液滴直径和散射角均小于2号凝胶模拟液。

3) 收集距离3~5 cm,针管内径0.41 mm是使用多针管喷头进行凝胶推进剂静电喷雾的最优实验参数,同2号凝胶模拟液相似流变特性的凝胶推进剂可以用于多针管喷头静电雾化,雾化区域分布均匀,可以用于双组元雾化燃烧系统。

#### 参考文献:

- [1] MOSHER D E. Understanding the extraordinary cost growth of missile defense [J]. Arms control today, 2000, 30 (10): 9-12.
- [2] HODGE K, CROFOOT T, NELSON S. Gelled propellants for tactical missile applications: AIAA 1999-2976 [R]. USA: AIAA, 1999.
- [3] Rahimi S, Natan B. Atomization characteristics of gel fuels: AIAA 98-3830 [R]. USA: AIAA, 1998.
- [4] 杨伟东,张蒙正. 凝胶推进剂流变及雾化特性研究与进展[J]. 火箭推进, 2005, 31(5): 37-42.  
YANG Weidong, ZHANG Mengzheng. Research and development of rheological and atomization characteristics of gelled propellants [J]. Journal of rocket propulsion, 2005, 31(5): 37-42.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] MA D J, CHEN X D, KHARE P, et al. Atomization patterns and breakup characteristics of liquid sheets formed by

- two impinging jets: AIAA 2011 - 97 [R]. USA: AIAA, 2011.
- [10] HAN Y, QIANG H, HUANG Q, et al. Improved Implicit SPH Method for simulating free surface flows of power law fluids [J]. *China-technological sciences*, 2013, 56(10): 2480-2490.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] JIDO M. Burning characteristics of electrostatically sprayed liquid fuel and formation of combined droplets of different fuels [C]// *Proceedings of 1989 Industry Applications Society Meeting*. [S. l.]: IEEE, 1989, 2: 2058-2065.
- [14] 闻建龙, 王军锋, 张军, 等. 柴油高压静电雾化燃烧的研究[J]. *内燃机学报*, 2003, 21(1): 31-34.
- [15] WATANABE H, MATSUYAMA T, YAMAMOTO H. Experimental study on electrostatic atomization of highly viscous liquids [J]. *Journal of electrostatics*, 2003, 57(2): 183-197.
- [16] RAYLEIGH L. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity [J]. *Philos mag.* 1882, 14(87): 184-186.
- [17] 何超. 燃油静电雾化和燃烧的实验和数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [18] THERON S A, YARIN A L, ZUSSMAN E, et al. Multiple jets in electrospinning: experiment and modeling [J]. *Polymer*, 2005, 46(9): 2889-2899.
- [19] XIE S, ZENG Y. Effects of electric field on multineedle electrospinning: experiment and simulation study [J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2012, 51(14): 5336-5345.

(编辑: 马杰)

(上接第53页)

- [4] 徐烈, 赵兰萍, 李兆慈, 等. 低温容器无损贮存中的最佳充满率[J]. *低温工程*, 1999(4): 126-131.
- [5] 荣顺, 高鲁嘉, 徐芳. 低温容器无损贮存规律[J]. 北京: *低温工程*, 1999(4): 132-135.
- [6] 穆鹏刚, 童飞, 蒲光荣, 等. 温度对贮箱增压系统的影响分析[J]. *火箭推进*, 2015, 41(4): 74-78.
- MU Penggang, TONG Fei, PU Guangrong, et al. Influence of temperature on tank pressurization system [J]. *Journal of rocket propulsion*, 2015, 41(4): 74-78.
- [7] 范瑞祥, 田玉蓉, 黄兵. 新一代运载火箭增压技术研究[J]. *火箭推进*, 2012, 38(4): 9-16.
- FAN Ruixiang, TIAN Yurong, HUANG Bing. Study on pressurization technology of the new generation launch vehicle [J]. *Journal of rocket propulsion*, 2012, 38(4): 9-16.
- [8] 陈春富, 李茂, 王树光. 液氧贮箱增压过程研究[J]. *火箭推进*, 2013, 39(4): 80-84.
- CHEN Chunfu, LI Mao, WANG Shunguang. Numerical study on pressurization process of liquid oxygen tank [J]. *Journal of rocket propulsion*, 2013, 39(4): 80-84.
- [9] ZILLIAC G, Karabeyoglu M A. Modeling of propellant tank pressurization: AIAA2005-3549 [R]. USA: AIAA 2005.
- [10] LI Zhaoci, XU Lie, SUN Heng, et al. Investigation on performances of non-loss storage for cryogenic liquefied gas [J]. *Cryogenics*, 2004, 44(5): 357-362.
- [11] FADDOUL J M, MCLNTYRE S D. The NASA cryogenic fluid management technology program plan: NASA-TM 1999-105256 [R]. USA: NASA, 1999.
- [12] AHUJA Vineet, HOSANGADI Ashvin, MATTICK Stephen, et al. Computational analyses of pressurization in cryogenic tanks: AIAA-2008-4752 [R]. USA: AIAA, 2008.

(编辑: 马杰)