

毛细管末端凝胶推进剂液滴形成过程数值研究*

刘泽军, 吴建军, 何 振, 胡小平

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 要开展凝胶推进剂液滴燃烧特性的实验研究, 必须首先形成凝胶推进剂液滴, 在毛细管末端形成液滴是常用的液滴生成方法之一。为了揭示毛细管末端凝胶推进剂液滴的形成过程, 求解了轴对称坐标系下的 $N-S$ 方程, 采用 VOF (volume of fluid) 方法捕捉液滴形成过程中气液交界面的演化规律, 研究了无量纲液滴颈部直径 D_N/D_0 和无量纲液滴高度 L/D_0 随时间的变化规律, 并且与实验结果进行比较, 验证了数值模型的可靠性。计算结果表明: 在液滴形成过程中, 液滴不是一直处于稳态; 液滴颈部存在较大的剪切率, 导致粘度下降, 进而加快了颈部的断裂和自由液滴的形成; 颈部断裂后, 与液滴相连的部分迅速与液滴融合, 出现很大的正向速度, 而与毛细管末端相连的部分迅速收回, 出现很大的负向速度。

关键词: 凝胶推进剂; 液滴形成; VOF 方法; 数值模拟

中图分类号: V435 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2012)06-0094-06

Numerical simulation of gel propellant drop formation from capillary tube

LIU Zejun, WU Jianjun, HE Zhen, HU Xiaoping

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Understanding drop formation of gel fuel is the first stage to conduct experimental investigation on combustion characteristics of single gel fuel droplet, and the formation of liquid drops at the end of a capillary tube is one of conventional methods. In order to investigate the formation of gel propellant drops at the end of a capillary tube, the Navier-Stokes equations were solved, and the VOF (volume of fluid) method is employed to track the gas/liquid interface during process of drop formation. The variation of dimensionless neck diameter D_N/D_0 and dimensionless drop height L/D_0 with time was analyzed, which agreed with the existing experimental results and validated the numerical model. The results show that drop is not always at the steady state; there is high shear rate at the drop neck, leading to dynamic viscosity decreasing and drop pinch-off; then drop pinch-off, the part of conjoint drop, coalesces into drop rapidly, and high positive velocity appears; however, the part of conjoint capillary tube coalesces into gel propellant at the end of capillary tube rapidly, and the high negative velocity appears.

Key words: gel propellant; drop formation; VOF method; numerical simulation

液滴燃烧是航空发动机、液体火箭发动机和内燃机等动力装置的基本燃烧模式。开展单个液滴燃烧特性的实验研究是揭开液体燃料燃烧特性的主要手段之一^[1-3], 液滴生成是液滴燃烧特性实验研究的前提。液滴的生成方法就确定了液滴的体积, 及形成所需要的时间等问题。目前国内采用的液滴生成方法有: 毛细管法, 步进电机推动注射器法, 微量泵法和微量阀门法等^[3-4]。在毛细管末端形成的液滴具有体积很小、易于控制等优点, 因此被广泛应用。针对毛细管末端形成液滴过程的理论研究、数值模拟和实验研究都一定程度上揭示了液滴形成和破碎机理^[4-9]。German^[4]采用实验方法研究了不同浓度的牛顿

流体(甘油水溶液)和剪切稀流体(黄原胶水溶液)在毛细管末端液滴的形成过程。刘华敏^[10]对不同浓度的甘油液滴形成过程进行了数值模拟, 分析影响液滴形成的主要因素。贺丽萍等^[11]采用数值模拟的方法研究了重力作用下微管末端液滴缓慢形成及脱落的动力学过程。分析了液滴形貌与液滴轴心线上流向速度的变化, 液滴内部涡环形成与湮灭的关系, 以及压力与液滴颈部位置及断裂位置的关系。

凝胶推进剂是一种多组分推进剂, 由于胶凝剂、助剂和颗粒添加剂的存在, 其流动属性发生了显著变化, 属非牛顿流。在毛细管末端形成液滴过程与甘油、水等牛顿流体存在一定的不同, 其剪

* 收稿日期: 2012-04-11

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 刘泽军(1983—), 男, 河南西峡人, 博士研究生, E-mail: liuzejun7994@126.com;

吴建军(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: jjwu@nudt.edu.cn

切变稀、触变性等特性会显著影响液滴的形成过程^[12]。因此,展开凝胶推进剂液滴形成规律的研究,对于液滴燃烧特性的实验研究有重要的意义^[12-14],也为非牛顿流体液滴的形成提供一定的参考。目前国内外对具有剪切变稀非牛顿流体流动研究的公开发表的文献不多,对其液滴的生成过程还没有看到公开发表的研究成果。张蒙正等^[15-16]对凝胶推进剂模拟液在直圆管中的流动特性进行了理论分析和试验研究;刘国庆等^[17]对凝胶推进剂在锥形圆管中的流动过程进行了数值计算,分析了锥形圆管收敛角对轴向速度、平均表观粘性、压降的影响规律,得到了流体在锥形圆管中的轴向速度与平均表观粘性的分布。

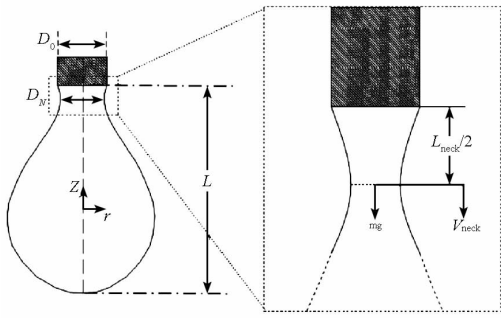


图1 液滴形状和描述参数^[4]

Fig.1 Droplet shape and dimensional parameter^[4]

本文针对凝胶推进剂,采用 Carreau-Yasuda 非牛顿流模型,对毛细管末端形成液滴过程进行数值计算,探究液滴形成过程中自由液面、液滴的最小颈部直径 D_N 和液滴高度 L (如图1所示)的变化规律;深入分析毛细管末端和液滴内部速度、剪切率和粘度的分布特性。研究结果可以为凝胶推进剂液滴燃烧实验中的液滴生成装置设计提供一定的参考。

1 数值方法及物理模型

1.1 控制方程

VOF 方法是一种在固定的欧拉网格下的界面跟踪方法^[18],可以广泛应用于分层流、自由面流动、液体中气泡的流动、喷射衰竭(表面张力)的预测等领域,能够有效地求解气液两相间的稳态或瞬时分界面。

本文研究的是凝胶推进剂在细管末端形成液滴过程。由于凝胶推进剂是非牛顿流体,在液滴形成过程中,液相与气相界面的演变比较复杂,对于这类相界面追踪捕捉问题上,VOF 法则具有容易实现、计算量较小和模拟精度高等特点。因此在研究中采用此法对液滴生成过程中的自由液面

进行追踪。并假设气液两相均为不可压粘性流体(由于气相的流速很低),且不相溶,只有动量的交换,不存在热量的传递。

不可压连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

考虑表面张力的动量方程为:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \mathbf{D}) + \mathbf{F}_s + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中 \mathbf{U} 为速度矢量, p 为压强, μ 为动力粘度, ρ 为密度, \mathbf{g} 为重力加速度, \mathbf{D} 为应力张量。 \mathbf{F}_s 便是表面张力引起的体积力,采用 Brackbill 提出的连续表面张力 CSF 模型^[9] (Continuum Surface Force Model),具体的表达式为: $\mathbf{F}_s = \sigma \cdot \kappa \cdot (\nabla \mathbf{a})$, σ 为表面张力, κ 为气液交界面的曲率。

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

用体积分数 f 来追踪气液分界面,其定义如下:

$$f = \begin{cases} 0, & \text{液滴外部} \\ 0 < f < 1, & \text{气液界面} \\ 1, & \text{液滴内部} \end{cases} \quad (4)$$

根据 f 可以得到计算区域中每一个网格对应的密度和粘度:

$$\rho = f \rho_l + (1 - f) \rho_g \quad (5)$$

$$\mu = f \mu_l + (1 - f) \mu_g \quad (6)$$

其中下标 g 和 l 分别表示气相和液相。

体积分数 f 的输运方程为

$$\frac{df}{dt} + \nabla \cdot (f \mathbf{U}) = 0 \quad (7)$$

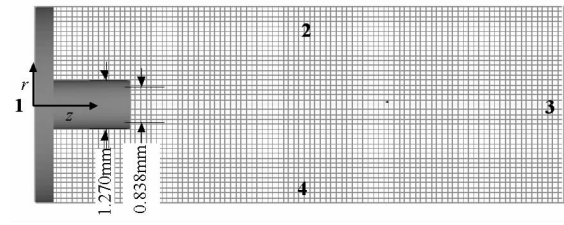
1.2 计算模型

计算采用的流动参数和毛细管结构与文献[4]中的一致。毛细管喷嘴的内部直径为 0.838mm,外部直径为 1.27mm,并且选取毛细管喷嘴的外部直径为特征长度,计算得到液滴生成过程中无量纲液滴高度 L/D_0 ,及无量纲颈部直径 D_N/D_0 随时间的变化规律。

由于计算区域的轴对称性,可以将三维问题简化为二维问题。计算区域的网格如图2所示,计算采用 Flow-3D V9.3 流体计算软件,它可以精确预测自由液面的流动 (free-surface flows)。文献[4]中是采用机械式注射泵供应液体形成液滴,本文在仿真计算时,设进口 1 为速度入口边界条件。计算区 2, 3, 4 为自由流出口边界。

1.3 非牛顿流体粘度计算

本文采用的凝胶推进剂模拟液,其粘度的计



1— inlet; 2, 3, 4— outlet

图 2 计算区网格的划分

Fig.2 Mesh schematic

算采用 Carreau-Yasuda 非牛顿流模型, 具体的表达式为

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = [1 + (K\dot{\gamma})^2]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (8)$$

其中 μ 为凝胶推进剂模拟液的粘度, μ_∞ 为在剪切率很大时的粘度, μ_0 为最大粘度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, K 为粘度系数 (consistency coefficient)。

2 计算结果与分析

2.1 计算方法验证

为了提高数值计算的准确性, 比较凝胶推进剂和牛顿流体液滴生成过程中的差异, 本文首先仿真计算了 80% 和 98% 的丙三醇溶液液滴生成过程, 并且与实验结果进行了比较。计算中用到的丙三醇溶液的物性参数^[4]见表 1。

表 1 丙三醇溶液的物性参数

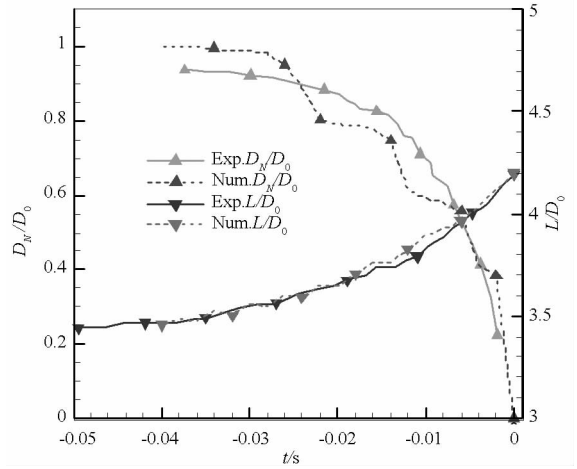
Tab.1 Fluid properties of glycerol solutions

丙三醇的质量浓度	密度 (kg/m ³)	动力粘度 (Pa · s)	表面张力 (N/m)
0.80	1211	0.056	0.070
0.98	1256	0.925	0.069

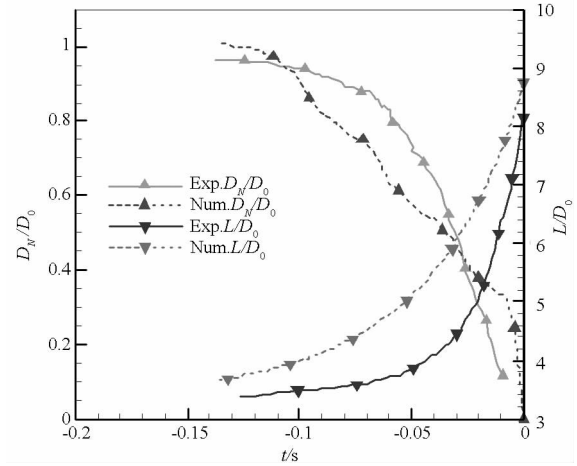
图 3 给出了两种不同浓度的丙三醇溶液液滴生成过程中液滴颈部直径 D_N/D_0 和液滴高度 L/D_0 随时间的变化。在文中定义液滴颈部直径逐渐减小直至断裂, 液滴形成的时刻定为 $t = 0s$, 液滴生成前的时间为负值, 而生成后的时间为正值。可以看出计算结果与文献[4]的实验结果基本吻合, 验证了数值方法对于粘度较小溶液和粘度较大溶液的计算结果都是可信性; 同时对于粘性较大的 98% 的丙三醇溶液, 液滴生成需要的时间较长, 并且液滴的高度较大。

2.2 液滴形成过程分析

计算采用的胶凝模拟液的物性参数都来自文献[4]。 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$, $\sigma = 0.071\text{N/m}$, 其中动力粘度的计算采用 (8) 式 ($\mu_\infty = 0.001$, $\mu_0 =$



(a) 80% 的丙三醇溶液



(b) 98% 的丙三醇溶液

图 3 液滴无量纲颈部直径 D_N/D_0 和高度 L/D_0 随时间的变化

Fig.3 Temporal variation in drop neck D_N/D_0 and drop height L/D_0

1.3451, $n = 0.3874$, $K = 21.0036$)。计算得到的液滴形成的全过程如图 4 所示, 滴生成过程中液滴颈部直径 D_N/D_0 和液滴高度 L/D_0 随时间的变化, 以及与实验结果的比较见图 5。

由图 4 看出, 随着流体从毛细管入口不断流入, 逐渐在毛细管出口形成液滴, 并且体积不断增大, 液滴重力与表面张力、粘性力处于相对平衡状态, 如图 4a ~ b。由于在毛细管的表面和毛细管的出口存在有较大的剪切率, 流体粘度较小; 而液滴内部流动性很弱, 剪切率较小, 导致粘度较大。随着时间的推移, 液滴的质量越来越大, 当重力大于表面张力、粘性力时, 液滴的体积达到临界体积, 液滴的颈部开始出现, 如图 4c。随后液滴在重力的作用下不断下落, 颈部直径 D_N 不断减小, 液滴高度 L 逐渐增大, 如图 4c ~ g; 由于在液滴颈部存在较大的剪切率, 粘度大大下降, 最后重力克服粘性力, 液滴颈部直径继续减小, 直至颈部断裂和液滴的形

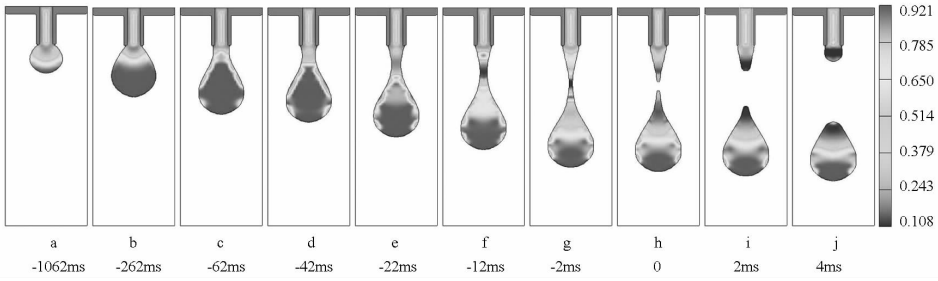


图 4 凝胶液滴生成过程的数值计算图像序列(单位:Pa·s)

Fig. 4 Gel drop shape during detachment

成,如图 4h。颈部断裂后,液滴在重力的作用下自由下落,与液滴相连的流体迅速与液滴融合,而毛细管末端被拉长的流体在表面张力的作用下收回,见图 4i~j。由图 5 可以看出计算结果和文献[4]中的实验结果基本吻合,与图 3 对比,可以知道其液滴的高度小于 98% 的丙三醇溶液液滴的高度(2 凝胶模拟液的最大粘度和 98% 的丙三醇

溶液的粘度差不多),其原因为凝胶模拟液为非牛顿流体,在液滴的颈部存在较大的剪切率,粘度大大降低,加快了液滴颈部的断裂和自由液滴的形成;而丙三醇溶液为牛顿流体,粘度不变。

2.3 粘度和剪切率变化分析

图 6 和图 7 分别给出了液滴颈部断裂前后轴线上粘度和剪切率分布的演变(图 6 中 B 点为液滴的最下端),图中沿轴向 0~2.5mm 范围为毛细管内部。可以看出在毛细管内部轴线上凝胶模拟液流动速度很低(约为 0.03m/s),且基本没有变化,因此流体承受的剪切率较小,其粘性较大且保持不变。在毛细管出口,由于液滴的出现,凝胶模拟液承受液滴的重力和表面张力的共同作用,存在较大的剪切速率,导致粘度下降;同时液滴在形成的过程中,体积不断增大,液滴承受的重力不断上升,液滴在重力、表面张力和粘性力的作用下出现上下抖动,导致剪切率和动力粘度呈现波动变化,见图 6(a)和图 7(a)。当液滴的颈部出现后,在颈部出现很大的剪切率,见图 7(a)中 N 点,同时在相应的位置,粘度出现最小值。

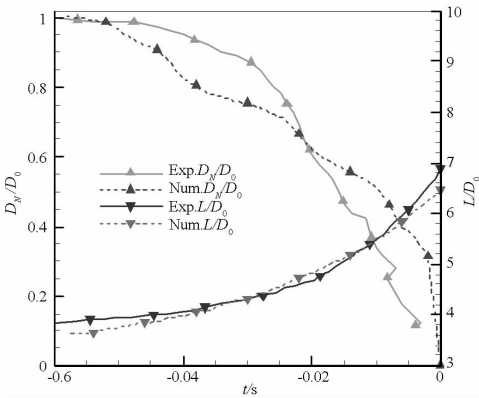
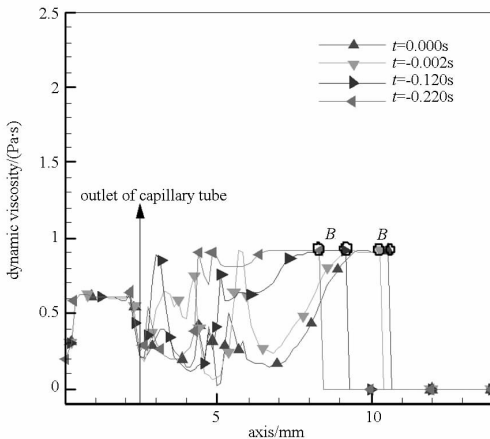
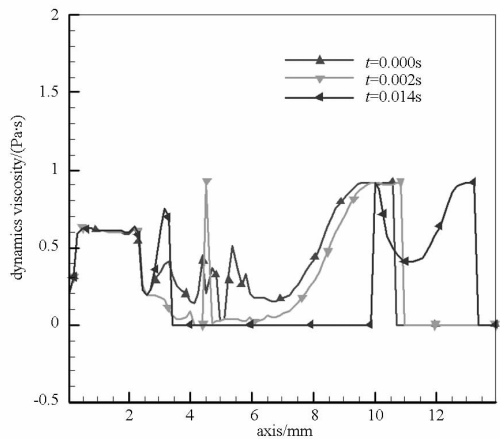


图 5 液滴颈部直径 D_N/D_0 和高度 L/D_0 随时间的变化

Fig. 5 Temporal variation of drop neck D_N/D_0 and drop height L/D_0



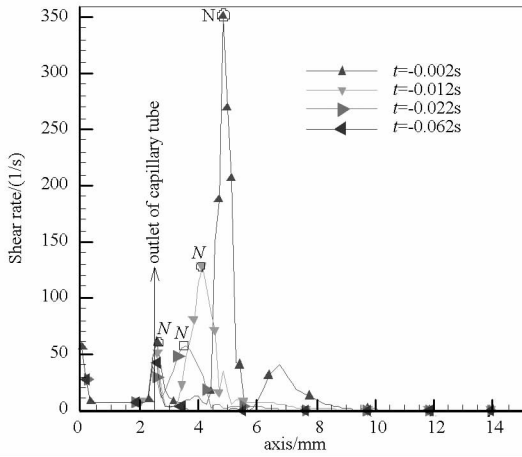
(a) 液滴颈部断裂前



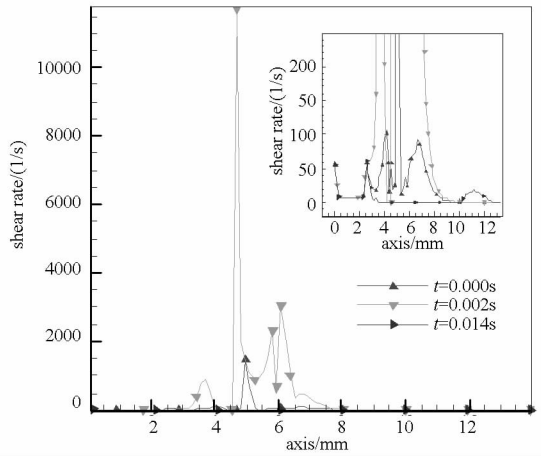
(b) 液滴颈部断裂后

图 6 轴线上粘度分布随时间的演变

Fig. 6 Axial viscosity distribution at the different moments



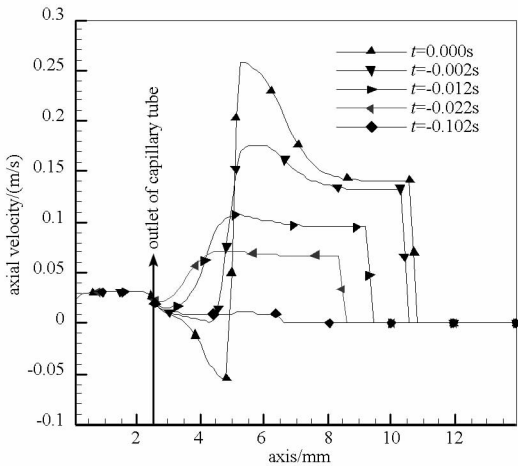
(a) 液滴颈部断裂前



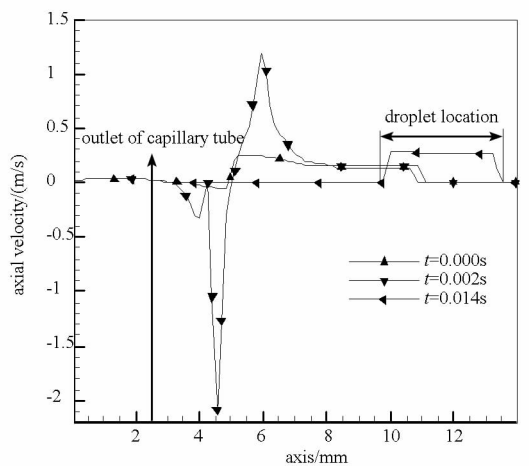
(b) 液滴颈部断裂后

图 7 轴心线上剪切率分布随时间的演变

Fig. 7 Axial shear rate distribution at the different moments



(a) 液滴颈部断裂前



(b) 液滴颈部断裂后

图 8 轴心线上的轴向速度分布随时间的演变

Fig. 8 Axial velocity distribution at the different moments

当液滴颈部断裂后,与液滴相连的部分在表面张力和粘性力作用下迅速与液滴融为一体,在融合过程存在较大的剪切率;而与毛细管末端相连的部分,在表面张力的作用下迅速收回,也同样存在较大的剪切率,见图 7(b)中 $t = 0.002s$ 时刻。因此在图 6(b)中对应的位置,动力粘度较小。随后液滴在重力的作用下自由下落,中间粘度和剪切率很小位置为气体环境。液滴表面在表面张力的作用下,剪切率较低,粘度较大;而液滴内部,由于液滴在下落的过程中,会发生变形,液滴内部存在一定的剪切率,导致粘度下降,见图 7(b)和 6(b)中 $t = 0.014s$ 时刻。

2.4 流动速度分析

图 8 示出了液滴颈部断裂前后轴线上的轴向速度分布随时间的演变。可以看出在液滴颈部出现以前,如图 8(a)中 $t = -0.102s$ 时刻,毛细管流

出的液体逐渐形成液滴,液滴自身的重力不足以克服表面张力和粘性力,因此轴向速度很低。随着液滴体积的不断增大,液滴的重力可以克服表面张力和粘性力,液滴的颈部出现,并且在重力的作用下开始下降,同时体积仍在不断增大,导致轴向速度不断增大,见图 8(a)中 $t = -0.102s, -0.022s, -0.012s, -0.002s$ 时刻。随后液滴在重力作用下不断下降,液滴高度不断增大,直到颈部断裂,见图 8(a)中 $t = 0.002s$ 时刻,与液滴相连的部分,在粘性力、表面张力的作用下,快速与液滴融合,导致很大的正向速度,最大值为 $1.2m/s$,约为毛细管内流速的 40 倍;与此同时,与毛细管相连的部分,同样在粘性力、表面张力的作用下,快速向毛细管末端靠拢,由于是方向相反,出现很大的负向速度,最大值为 $2.1m/s$,约为毛细管内流速的 70 倍。在液滴断裂后,见图 8(b)中 $t = 0.002s$ 时刻的情况与 $t =$

0.000s时刻类似,只是速度更大。到了 $t = 0.014s$ 时刻,液滴在重力作用下自由落体,速度不断增大,此时其速度为 $0.27m/s$ 。

3 结论

本文研究了凝胶推进剂在毛细管末端液滴的形成过程,采用 VOF 方法捕捉液滴形成过程中气液交界面的演化,利用文献中的实验结果与计算结果进行比较,分析了液滴形成过程中颈部直径和液滴高度随时间变化规律,以及轴线上粘度、剪切率和轴向速度分布随时间的演变,可以得到如下结论:

(1) 采用 VOF 方法可以捕捉到凝胶推进剂(非牛顿流体)液滴出现、生长和颈部断裂的全过程。在液滴形成过程中,由于不断变化的重力、粘性力和表面张力的共同作用,液滴不是一直处于稳态。液滴颈部断裂后,和液滴相连的部分迅速与液滴融为一体,而与毛细管末端相连的部分迅速收回。

(2) 对轴线上动力粘度和剪切率分布随时间演变的分析,可以得出,在液滴颈部存在较大的剪切率,导致粘度大大下降(约为 $0.1Pa \cdot s$),进而加快了颈部的断裂和自由液滴的形成。

(3) 分析不同时刻轴线上的轴向速度分布的演变,可以得到,液滴颈部出现后,液滴在重力的作用下,轴向速度不断增大;颈部断裂后,和液滴相连的部分迅速与液滴融合,出现很大正向速度(约为毛细管内流速的 40 倍),而与毛细管末端相连的部分迅速收回,出现很大负向速度(约为毛细管内流速的 70 倍)。

参考文献 (References)

- [1] 张蒙正. 凝胶燃料单滴燃烧的建模、实验和应用[J]. 火箭推进, 2010, 36(3): 1-9.
ZHANG Mengzheng. Modeling, experiment and application of single droplet combustion for gel fuel[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010, 36(3): 1-9. (in Chinese)
- [2] 丰松江, 何博, 聂万胜. 液体火箭凝胶推进剂燃烧特性研究进展[J]. 火箭推进, 2009, 35(4): 1-7.
FENG Songjiang, HE Bo, NIE Wansheng. Progress in combustion characteristic research of liquid rocket gelled propellants[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(4): 1-9. (in Chinese)
- [3] Liu Z J, Hu X P, He Z, et al. Experimental study on the combustion and microexplosion of freely falling gelled unsymmetrical dimethylhydrazine (UDMH) fuel droplets[J]. Energies. 2012; 5(8): 3126-3136.
- [4] German G, Bertola V. Formation of viscoplastic drops by capillary breakup [J]. Physics of Fluids, 2010; 033101.
- [5] Coussot P, Gaulard F. Gravity flow instability of viscoplastic materials: The ketchup drip [J]. Phys. Rev. E, 2005, 72: 031409.
- [6] German G, Bertola V. Impact of shear-thinning and yield-stress drops on solid substrates [J]. J. Phys.: Condens. Matter, 2009, 21: 375111.
- [7] Bertola V. Wicking with a yield-stress fluid [J]. J. Phys.: Condens. Matter 2009, 21: 035107.
- [8] Yildirim O E, Basaran O A. Dynamics of formation and dripping of drops of deformation-rate-thinning and thickening liquids from capillary tubes [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2006, 136: 17-37.
- [9] Cooper-White J J, Fagan J E, Tirtaatmadja V, et al. Drop formation dynamics of constant low-viscosity, elastic fluids[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2002, 106: 29-59.
- [10] 刘赵森, 刘华敏, 金艳梅. 丙三醇溶液液滴形成过程的数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(1): 14-19.
LIU Zhaomiao LIU Huamin, JIN Yanmei. Numerical simulation of droplet formation of glycerin in water [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(1): 14-19. (in Chinese)
- [11] 贺丽萍, 夏振炎, 姜楠. 低流量微管末端液滴形成及破碎的数值模拟[J]. 化工学报, 2011 (6): 1502-1507.
HE Liping, XIA Zhenyan, JIANG Nan. Simulation of drop formation and breakup from capillary tube at low flow rates [J]. CIESC Journal, 2011, (6): 1502-1507. (in Chinese)
- [12] 刘海燕, 庞明军, 魏进家. 非牛顿流体研究进展及发展趋势 [J]. 应用化工, 2010, 39(5): 740-746.
LIU Haiyan, PANG Mingjun, WEI Jinjia. A progress and trend of the non-Newtonian fluids [J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(5): 740-746. (in Chinese)
- [13] 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): 139-144.
WANG Ningfei, MO Hongjun, FAN Xuezhong. A review on development and application of gelled propellants [J]. Energetic Materials, 1998, 6(3): 139-144. (in Chinese)
- [14] 魏超, 杨伟东, 毛根旺. 某高分子胶凝胶推进剂模拟液的流变特性[J]. 航空工程进展, 2011, 2(1): 110-114.
WEI Chao, YANG Weidong, MAO Genwang. Rheological behavior of a polymer-gellant gel propellants simulants [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(1): 110-114. (in Chinese)
- [15] 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): 46-51.
ZHANG Mengzheng, CHEN Wei, YANG Weidong, et al. Atomization and characteristics of gelled propellant with impinging injector [J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(1): 46-51. (in Chinese)
- [16] 张蒙正, 左博. 幂律型凝胶推进剂管路中的流动特性 [J]. 推进技术. 2009, 30(2): 246-250.
ZHANG Mengzheng, ZUO Bo. Flow behavior of power law model gelled propellant in the pipe [J]. Journal of Propulsion Technology, 2009 30(2): 246-250. (in Chinese)
- [17] 刘国庆, 蔡体敏, 夏学礼, 等. 凝胶推进剂锥形管道流动特性数值分析[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(2): 154-158.
LIU Guoqing, CAI Timin, XIA Xueli, et al. Numerical analysis on flow property of gel propellants in tapered round pipes [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, 32(2): 154-158. (in Chinese)
- [18] 王建军, 李其汉, 陆明万. 自由液面流体流动问题的数值分析研究[J]. 计算力学学报, 2003 (1): 101-108.
WANG Jianjun, LI Qihan, LU Mingwan. Numerical methods for free-surface fluid flow-a review [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003 (1): 101-108. (in Chinese)