文章编号:1006-9941(XXXX)XX-0001-09

等离子射流在模拟液体发射药中扩展特性的数值模拟

薛皓琦,余永刚

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 为了深入认识液体工质电热化学炮中等离子射流的点火过程,开展了等离子射流在液体发射药LP1846模拟工质中扩展特性的研究,建立了等离子射流在液体中扩展的二维轴对称非稳态数学模型,并与基于液体工质为水的文献实验进行模型验证。在此基础上对等离子射流在LP1846液体发射药模拟工质中的扩展过程进行数值模拟,分析等离子射流在扩展过程中形态的变化以及射流场压力、速度和温度的分布特性。结果表明,扩展过程中由于Taylor-Helmholtz不稳定性,等离子射流和液体发射药模拟工质两相间存在湍流掺混现象,并随着扩展逐渐加剧,表现为射流头部凸出并逐渐轴向拉长形成尖头,同时射流卷吸液体发射药模拟工质在Taylor空腔中产生液滴,且数量逐渐增多。此外,等离子射流扩展过程中近喷孔处由于液体发射药模拟工质回流而出现颈缩现象。射流场由于膨胀波-压缩波交替作用而存在波动现象,且在近喷孔处尤为剧烈,表现为压力场呈现高低压相间分布,速度场也呈类似分布。

关键词: 等离子射流;液体工质;扩展特性;湍流掺混;数值模拟;发射药

中图分类号: TJ55;O64 **文献标志码**: A **DOI**:10.11943/CJEM2023206

0 引 言

等离子射流点火具有点火延迟短、能量大、稳定性高以及环境适应性好等特点[1],其在军事领域的重要应用之一是电热化学发射技术。电热化学发射技术兼具了传统化学能发射和电能发射的优势,可显著提高身管武器的初速[2],将其应用到火炮中称为电热化学炮。电热化学炮的做功工质分为固体和液体发射药,其中液体发射药具有能量密度高、爆温低、碰撞敏感性低、毒性小以及成本低等优点[3],但液体工质电热化学炮的点火过程关键而复杂,等离子射流点燃药室中液体发射药的过程特性直接影响内弹道性能的稳定。点火时等离子射流先在液体药中形成Taylor空腔,由于Taylor-Helmholtz不稳定性而存在剧烈的两相湍流掺混现象[4-5],使发射药的燃烧过程难以控制,进而影响火炮内弹道的稳定性与安全性。因此,研究等离子射流的点火过程,首先必须了解等离子射流在液体发射药中的扩展过程。以此为背景,国内外学者围绕等离子射流与液体的相互作用问题开展了系列研究工作。

前人为了安全起见,采用水作为液体发射药模拟工质进行了相关实验。20世纪九十年代,Kuo等[6-7]就利用高速录像系统记录了等离子射流在液体中的扩展过程,并建立了卷吸雾化模型,对Taylor-Helmholtz不稳定性进行了描述。国内刘东尧等[8-9]对小口径液体工质电热化学炮进行实验研究,得出环状装药结构可以增进等离子体与发射药的相互作用,进而提高内弹道性能;同时在实验的基础上,建立了液体工质电热化学炮内弹道一维两相流模型。周彦煌等[10]采用高速摄影系统,研究了放电能量、喷孔结构对等离子射流在液体中扩展特性的影响,并发现两相界面存在冷却暗区。近年来,余永刚团队[11-13]就药室边界形状对等离子射流在液体中扩展过程的影响进行了一系列研究,并对渐扩型药室可有效抑制等离子射流不稳定性的机理进行了讨论。张琦等[14]在实验的基础上建立了等离子射流在液体中扩展的二维轴对称非稳态模

收稿日期: 2023-09-25; **修回日期**: 2023-12-03

网络出版日期: 2024-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(51506094)

作者简介: 薛皓琦(1997-),女,硕士研究生,主要从事等离子射流特性的研究。e-mail:soraya1105@163.com

通信联系人: 余永刚(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事含能材料燃烧推进技术研究。e-mail:yyg801@njust.edu.cn

引用本文:薛皓琦,余永刚. 等离子射流在模拟液体发射药中扩展特性的数值模拟[J]. 含能材料, DOI:10.11943/CJEM2023206.

XUE Hao-qi,YU Yong-gang. Simulation of Spreading Characteristics of Plasma Jet in Simulative Liquid Propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, DOI:10.11943/CJEM2023206.

型,通过计算得到了射流场压力、速度和温度的分布规律,同时对Taylor空腔的间断机理进行了分析。刘怡等[15-16]研究了放电电压、喷嘴直径对等离子射流在液体中扩展特性的影响,并在实验的基础上建立了等离子射流场二维非稳态轴对称数学模型,研究了喷射压力、燃烧室形状、台阶结构等多种因素对等离子射流扩展稳定性的影响。

综上所述,目前对于等离子射流在液体中扩展特性的研究主要基于水这种工质体系,直接针对液体发射药模拟工质的研究很匮乏。而液体发射药的黏度和密度等参数与水不同,对等离子射流的扩展过程有显著影响,进而影响到等离子射流点燃液体药的过程,因此采用液体发射药作为工质开展研究十分必要。硝酸羟胺基液体发射药LP1846是一种绿色高能液体推进剂,具有物化性能稳定、无毒、不易燃不易爆等特点,其燃烧特性又能满足武器射击要求,已用于液体工质电热化学炮研究中,在航天和国防等领域也展现出广阔的应用前景[17]。基于此背景,本研究采用Fluent软件开展了等离子射流在LP1846液体发射药模拟工质中扩展特性的数值研究,获得等离子射流形态演化,以及射流场压力、速度和温度的时空分布特性,研究结果对深入认识液体工质电热化学炮的点火机理有重要价值。

1 等离子射流在液体中扩展的理论模型

1.1 模型的建立

1.1.1 基本假设

根据等离子射流在液体中扩展的特点,建立二维轴对称非稳态模型。根据实验中等离子射流的物化特性及观察到的扩展现象,采用如下假设:

(1)等离子射流与液体工质间的作用过程为湍流掺混过程。

(2)忽略等离子射流自身电磁力、体积力等次要因素的影响。

(3)本研究中涉及到的是弱电离等离子体,将其近似作为高温高压理想气体。

(4)不考虑等离子射流的辐射作用。

1.1.2 数学模型

等离子射流在液体工质中的扩展过程涉及到等离子体相、液相和大气三种互不混溶的流体相,因此求解过程中界面的捕捉采用Volume of Fluent Model(VOF)模型[18],利用相体积分数这一变量,对等离子射流界面进行追踪。采用如式(1~3)控制方程:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial\left(\alpha_{\mathrm{q}}\right)}{\partial t}+\boldsymbol{\nu}\cdot\nabla\alpha_{\mathrm{q}}=0 \tag{1}$$

式中,α_{q}为相体积分数,约束条件为$\sum_{\mathrm{q}=1}^{3}\alpha_{\mathrm{q}}=1$;$\boldsymbol{\nu}$为速度矢量,$\mathrm{m\cdot s^{-1}}$。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho E\right)+\nabla\cdot\left[\boldsymbol{\nu}\left(\rho E+p\right)\right]=\nabla\cdot\left(k_{\mathrm{eff}}\nabla T\right)+S_{\mathrm{h}} \tag{2}$$

式中,ρ为密度,$\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$;E为总能量,J;p为压力,Pa;k_{eff}为有效热导率,$\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$;$T$为温度,K;$S_{\mathrm{h}}$为能量源项,$\mathrm{kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-3}}$。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho\mathrm{v})}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{\nu}\boldsymbol{\nu})=-\nabla p+\nabla\cdot[\mu(\nabla\boldsymbol{\nu}+\nabla\boldsymbol{\nu}^{\mathrm{T}})] \tag{3}$$

式中,μ为动力黏度,$\mathrm{N\cdot s\cdot m^{-2}}$。

数值模拟中考虑湍流效应,根据等离子射流在液体工质中扩展的实验结果[19]以及文献[20],本研究选用标准k-ε湍流模型(式(4)~(5))进行计算,方程如下:

$$\rho\frac{Dk}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{4}$$

式中,k为湍流动能,J;t为时间,s;μ_t为湍流黏度,$\mathrm{N\cdot s\cdot m^{-2}}$;$\sigma_k$为$k$的湍流普朗特数,$\sigma_k$=1.0;$G_k$为平均速度梯度引起的湍流动能,J;$G_b$为浮力影响引起的湍流动能,J;$\varepsilon$为湍流动能的耗散率;$Y_M$为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的贡献;$x_i$为空间坐标。

$$\rho\frac{D\varepsilon}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{i}}}\left[\left(\mu+\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{\mathrm{i}}}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_{\mathrm{k}}+G_{\mathrm{b}}\right)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

式中,σ_ε为ε的湍流普朗特数,σ_ε=1.3;$C_{1\varepsilon}$和$C_{2\varepsilon}$为常数,$C_{1\varepsilon}$=1.44,$C_{2\varepsilon}$=1.92。

1.1.3 模拟方法

根据等离子射流在液体中扩展的实验研究结果,针对等离子射流的特点以及数值计算研究的侧重点,选用Fluent软件[18]进行求解。求解过程中选用Pressure Implicit with Splitting of Operators(PISO)算法[18],用来求解耦合速度压力。

计算中为了保证数值解的准确性、稳定性和经济性,采用的离散格式如表1所示。

1.1.4 模拟计算域及初边条件

数值模拟的计算域如图1所示,为避免液体工质回流造成出口边界条件改变,设计了包括大气环境的区

表 1 Fluent求解器的空间离散格式

Table 1 Spatial discretization of Fluent solver

variable	spatial discretization
gradient	least squares cell based
pressure	PRESTO
density	second order upwind
momentum	second order upwind
volume fraction	geo-reconstruct
turbulent kinetic energy	second order upwind
turbulent dissipation rate	second order upwind
energy	second order upwind

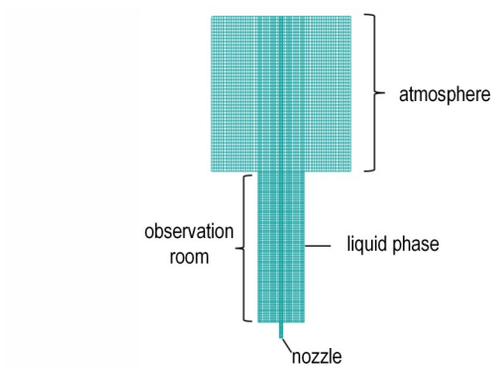


图 1 计算域网格划分

Fig.1 Grid division of computational domain

域。计算域总高208 mm,其中大气区域为高100 mm,直径90 mm的圆柱体;观察室为高98 mm,直径30 mm的圆柱体;喷嘴高10 mm,直径为2 mm。数值计算中喷嘴作为入口,采用压力入口边界条件($p=p_0$);大气区域的所有边界均为出口,采用压力出口边界条件($p=p_1$);观察室的边界用于约束流体,采用壁面边界条件。计算域采用矩形结构化网格进行划分,其中喷嘴采用0.14 mm×0.17 mm的网格加密划分,观察室采用0.18 mm×0.20 mm的网格划分,大气区域采用0.30 mm×0.40 mm的网格划分,整个计算域网格总数为89392个。计算域的初始条件即为大气条件($p=p_1$, $T=T_1$)。

计算前进行网格无关性验证。首先对计算域进行初次网格划分,网格总数为58059,命名为网格A;接下来进行网格加密处理,网格总数为89392,命名为网格B;之后对网格进行二次加密处理,网格总数为202618,命名为网格C。采用脉冲电源放电电压为2700 V的实验工况[16],对网格A、B、C分别进行计算,得到的等离子射流轴向扩展位移随时间变化的曲线如图2所示,由图2可知:网格A的计算结果和网格B相比最大偏差为5.75%,而网格B和网格C之间的最大

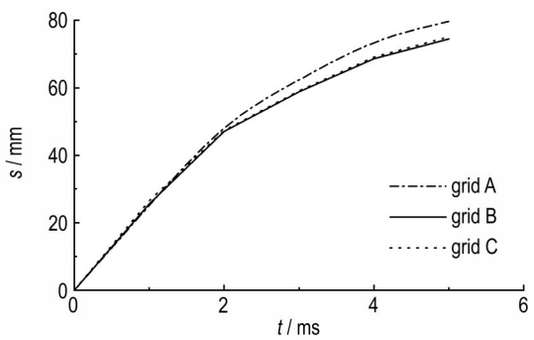


图 2 计算域网格无关性验证

Fig. 2 Verification of grid independence in computational domain

偏差仅为1.09%。通常情况,同一计算域的网格越密,计算精度越高,但同时计算时间也越长。因此,为了在保证精度的同时尽可能节省时间,本研究选用网格B进行后续的计算。

1.2 模型的实验验证

1.2.1 实验部分与参数设置

为了验证上述计算模型,采用文献[19]的实验结果,所用的实验装置系统如图3所示,它由脉冲电源、等离子发生器、观察室、高速摄影系统及控制电脑端组成。考虑到实验安全问题,观察室中装填的液体工质是水,计算时水的物性参数为:密度ρ=1000 kg·m^{-3}、比热容C_p=4200 J·kg^{-1}·K^{-1}、动力黏度μ=1.01×10^{-3} Pa·s。实验过程中,脉冲电源放电激发等离子发生器产生等离子体,等离子体不断累积直至冲破膜片,形成等离子射流从喷孔喷入观察室。

实验中脉冲电源放电电压为2700 V,喷嘴直径为2 mm,通过压力传感器测得等离子射流的破膜压力为4.6 MPa[19]。在数值计算中,将破膜压力作为入口边界压力,取为p_0=4.6 MPa,等离子射流温度取为T_0=5000 K[21];计算域出口边界参数与大气环境相同,取为:p_1=101325 Pa, T_1=300 K。

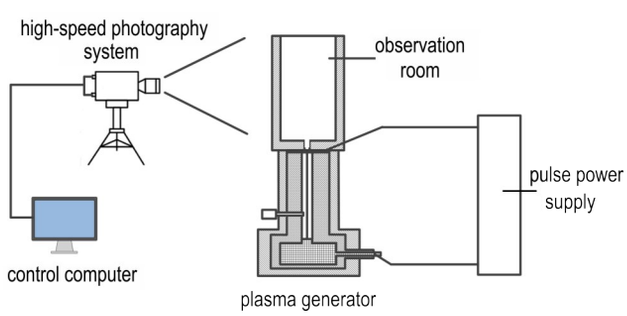


图 3 实验装置系统图[19]

Fig.3 System diagram of experimental device[19]

1.2.2 模型验证

采用上述模型和实验工况参数对等离子射流在水中的扩展过程进行数值模拟,图4为t=4 ms时实验和模拟得到的等离子射流扩展过程中两相界面演化的对比图。由图4可知,模拟计算得到的等离子射流在水中扩展的形态与实验结果基本一致。

为了进一步验证模型的准确性,对比了1~5 ms内等离子射流在水中轴向扩展位移随时间变化的实测数据[19]与模拟计算结果(图5)。由图5可知,数值计算结果与实测结果吻合较好,平均误差为1.12%。因为模拟液体药仅与水的密度、黏度等参数不同,物理过程的本质相同,适用于同一套流体力学方程组,故可说明本研究建立的理论模型合理,可用于研究等离子射流在模拟液体药中的扩展特性。

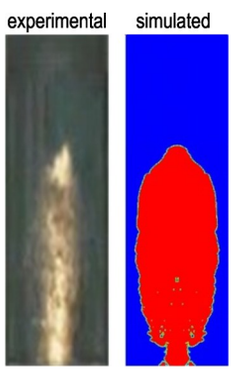


图4 实验结果[19]和模拟结果对比(t=4 ms)

Fig. 4 Comparison between experimental[19] and simulated result(t=4 ms)

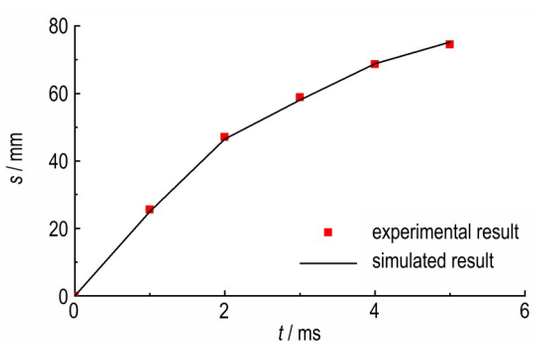


图5 等离子射流在水中轴向扩展位移实验值[19]与模拟值的比较

Fig. 5 Comparison between experimental[19] and simulated results of axial expansion displacement of plasma jet in water

2 等离子射流在LP1846模拟工质中扩展特性数值模拟

2.1 等离子射流扩展模型参数与模拟

研究采用上述理论模型对等离子射流在液体发射药LP1846模拟工质中的扩展过程进行数值模拟。其中,等离子射流的计算工况取喷射压力为4.6 MPa,喷嘴直径为2 mm,液体工质采用液体发射药LP1846的相关物性参数[22],见表2。

表2 液体发射药LP1846模拟工质的物性参数[22]

Table 2 Parameters of simulative liquid propellant LP1846[22]

parameters	M /kg·mol^{-1}	C_p /J·kg^{-1}·K^{-1}	ρ /kg·m^{-3}	μ /Pa·s	λ /W·m^{-1}·K^{-1}
value	54.49	4180	1430	6.306×10^{-3}	0.203

Note: M is molar mass. C_p is specific heat at constant pressure. ρ is density. μ is dynamic viscosity. λ is coefficient of thermal conductivity.

2.2 模拟结果与讨论

2.2.1 等离子射流的形态变化

图6为等离子射流在液体发射药LP1846模拟工质中扩展时的形态变化图。由图6可知,等离子体经过喷嘴射入LP1846后,射流在轴向和径向上同时进行扩展,并在液体工质中形成了Taylor空腔。扩展过程中,射流头部由于Taylor-Helmholtz不稳定性而存在波动,刚开始t=0.5 ms时,射流头部凸出;1~2 ms时段内,射流头部出现轻微凹陷;3 ms时,射流头部又开始凸出;3~5 ms时段,射流头部的凸出现象越来越明显;5.5~6 ms时段,射流头部凸出显著且形成比较尖锐的头部。这种现象说明随着扩展的进行,Taylor-Helmholtz不稳定性在逐渐加剧。此外,5~6 ms的形态图中,Taylor空腔中出现了小液滴,且数量逐渐增多,这是由于等离子射流在扩展过程中和液体工质间存在湍流掺混现象,射流会卷吸液体工质形成液滴。扩展前期等离子射流和液体工质间也存在湍流掺混,但较轻微,表现为射流边界存在波动不光滑,而湍流掺混效应会随扩展的进行逐渐加剧。同时,5~6 ms的形态图中,观察到等离子射流扩展过程中出现了颈缩现象,这是因为随着Taylor空腔的体积不断增大,一部分液体工质被挤压回流,但由于壁面限制无法排出,在近喷嘴处积聚,使得近喷嘴处的等离子射流被挤压,从而产生颈缩。

2.2.2 射流场压力分布

图7为等离子射流在液体发射药LP1846模拟工质中扩展的流场压力云图。由图7可以看出,射流内部压力呈高低压相间分布,这是因为等离子射流扩展过程中,头部存在一个高压区,高压区产生膨胀波使射流向外扩展,射流内部压强开始逐渐降低,当射流内部

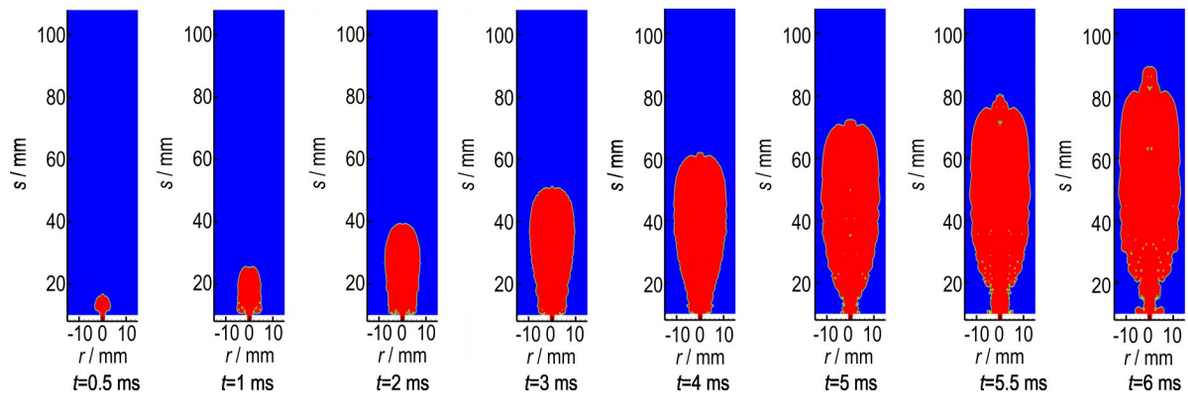


图 6 等离子射流扩展过程中的形态变化

Fig.6 Morphological changes during the expansion of plasma jet

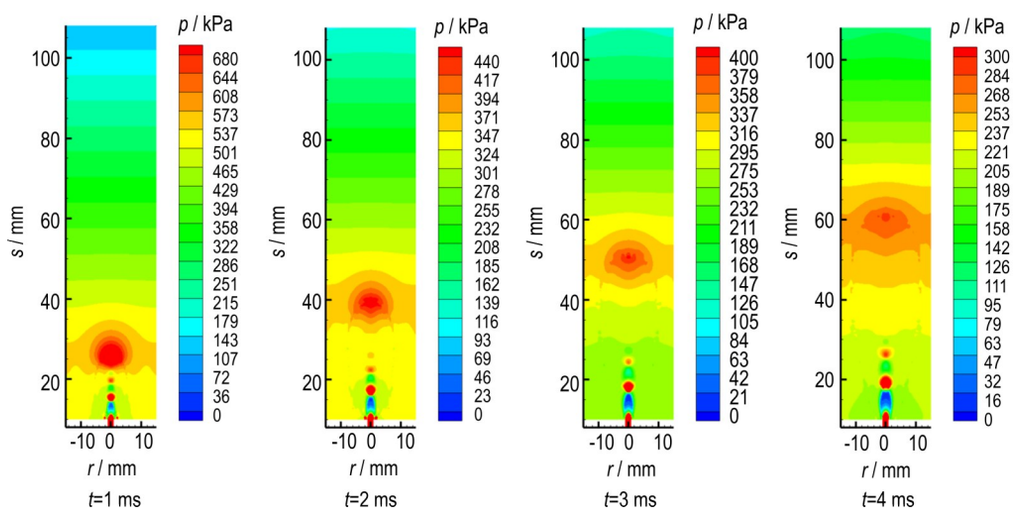


图 7 等离子扩展过程中射流场压力云图

Fig.7 Pressure nephogram during the expansion of plasma jet

压强刚低于外部液体工质的压强时，膨胀波向内反射产生压缩波，压缩波迫使射流向内流动来增加其内部的压强，当射流内部压强逐渐增大并达到一定值时会再次产生膨胀波，这种膨胀波-压缩波交替作用的过程，使射流内部压力呈现出高低压相间分布的规律。同时，图 7 中还可以看到，射流场近喷嘴处的压力波动尤为剧烈，这是由于近喷嘴处射流的扩展速度较快，膨胀波−压缩波交替得也快，使近喷嘴处高低压波动剧烈。此外，图 7 中可以观察到射流前端的压力呈梯度递减分布，出现这种现象是因为等离子射流头部压缩前方静止的液体工质产生了压缩波，压缩波沿轴向传播，在射流前端形成了明显的压力梯度。而由图 7 右侧的图例可知，等离子射流扩展过程中，压力场的压力值在逐渐减小。

2.2.3 射流场速度分布

图 8 为等离子射流在液体发射药 LP1846 模拟工质中扩展的速度场分布。其中图 8a 为轴向速度云图，由图 8a 可知，等离子射流喷射进入液体工质后，会在近喷嘴处形成一个高速区，接着射流速度沿轴向逐渐降低，5 ms时等离子射流的轴向速度开始衰减。同时可以观察到，轴向速度场存在波动，近喷嘴处呈现高低速相间分布的规律，出现这一现象的原因是扩展过程中存在膨胀波-压缩波交替作用。此外，图 8a 中射流周围存在明显的负速度区，这是因为液体工质受等离子射流扩展的影响而产生了回流。总之，射流场轴向速度随着扩展的进行逐渐降低，且近喷嘴处呈现高低速相间分布的规律。

图 8b 为径向速度云图，由图 8b 可知，径向速度分布以喷嘴为轴呈现高度轴对称性，近喷嘴处存在一个高速区。等离子射流扩展过程中，5 ms时射流的径向速度场开始衰减，径向速度场中形成了负速区，这也是受膨胀波-压缩波交替作用的影响。总体上径向速度

场沿轴向呈现出高速-负速相间分布的规律。

图8c为流线图,由图8c可知,扩展过程中,射流前方流线方向向上,且互相平行;而射流两侧流线方向向下,且呈涡旋状,出现这一现象是因为等离子射流会挤压液体工质使其流动,射流前方的液体工质会沿着轴向流出观察室,而射流两侧的液体工质由于壁面无法排出形成了回流。1 ms时,射流扩展过程刚开始,对两侧液体工质挤压不明显,所以没有形成明显的回流区域;3~5 ms时,等离子射流对液体工质的挤压作用逐渐增强,回流区域的范围也随之逐渐变大。同时可以看到,等离子射流内部在扩展过程中形成了一个主涡旋,方向向外,这是由于膨胀波-压缩波交替作用而形成的。1~3 ms时,主涡旋范围逐渐变大且向前运动;5 ms时,等离子射流的轴向、径向速度场都开始衰减,主旋涡也随之开始消散。总的来说,扩展过程中,射流内部会形成一个方向向外的主涡旋,射流两侧的流线由于回流呈方向向下的涡旋状。

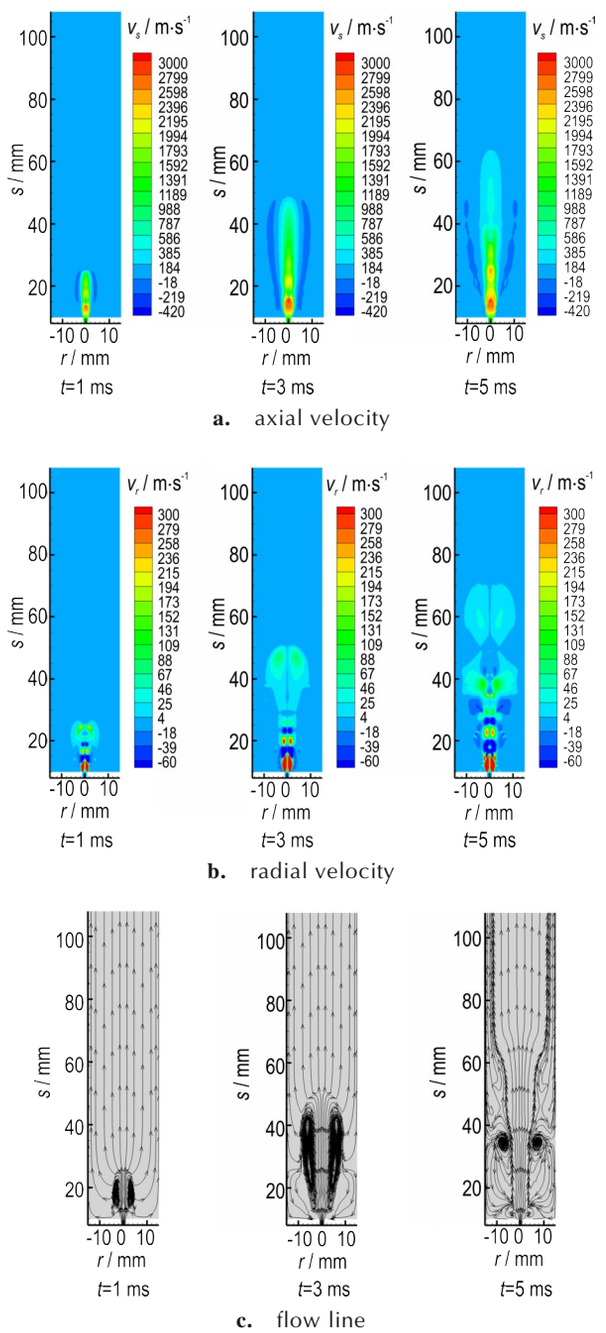


图8 等离子射流扩展过程中的速度场分布

Fig.8 Velocity field distribution during the expansion of plasma jet

2.2.4 射流场温度分布

图9为等离子射流在液体发射药LP1846模拟工质中扩展的温度云图。由图9可知,等离子射流喷射进入液体工质后,温度场存在剧烈波动。温度先降低,再和液体工质挤压形成一个高温区,之后射流温度沿轴向、径向逐渐降低。从图9中可以看到,1 ms时等离

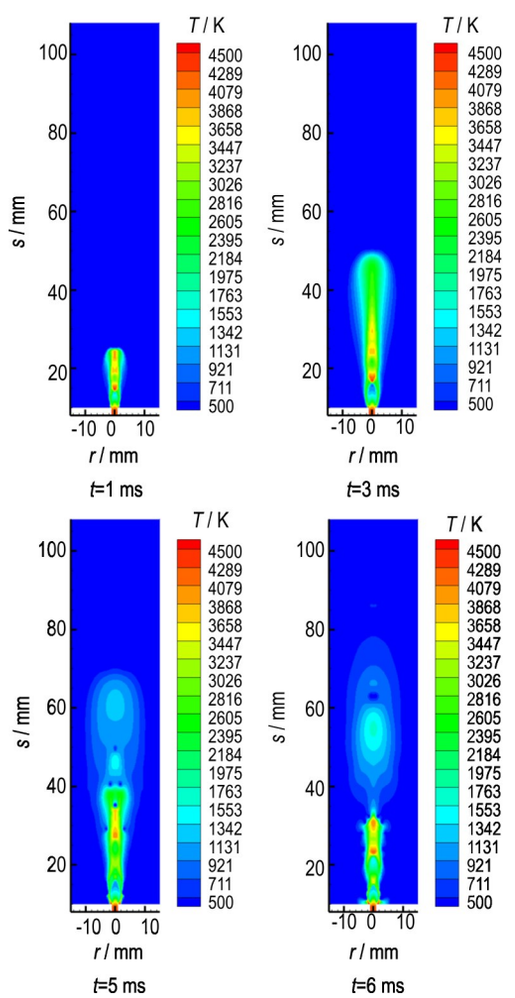


图9 等离子射流扩展过程中的温度云图

Fig.9 Temperature nephogram during the expansion of plasma jet

子射流头部也有一个高温区，但随着射流扩展过程中能量和热量不断耗散，射流头部高温区的温度逐渐下降，3 ms时趋于射流主体温度，5 ms时低于射流近喷嘴处温度。此外，等离子射流扩展过程中，近喷嘴处温度场呈高低温相间分布的规律，这也是受膨胀波-压缩波交替作用的影响。但总的来说，通过图9的温度云图可知，随着等离子射流扩展的进行，射流场的温度是逐渐降低的，5~6 ms时温度场中平均温度急剧衰减。

3 结 论

研究建立了等离子射流扩展的二维轴对称非稳态模型，并通过与实验数据对比验证了模型的合理性，在此基础上采用数值计算的方法，开展了等离子射流在液体发射药LP1846模拟工质中扩展特性的研究，得出如下结论：

(1)等离子射流在液体药LP1846模拟工质中扩展时，由于Taylor-Helmholtz不稳定性，射流头部发生凸变，且射流边界不够光滑；扩展过程中两相间存在湍流掺混现象，且随扩展的进行而逐渐加剧；射流近喷嘴处由于回流存在颈缩现象。

(2)等离子射流扩展过程中，受膨胀波-压缩波交替作用的影响，压力场、速度场和温度场都存在波动现象，近喷嘴处的波动尤为剧烈。同时，扩展过程中，压力、速度和温度均随时间逐渐降低，到了扩展后期衰减更为明显。

(3)等离子射流在液体发射药LP1846模拟工质中扩展时，受膨胀波-压缩波交替作用的影响，射流内部形成一个方向向外的主涡旋，扩展前期，涡旋随射流扩展逐渐前移且范围逐渐变大；扩展后期，涡旋随轴向、径向速度的衰减而消散。

参考文献：

[1] STARIKOVSKAIA S M. Plasma-assisted ignition and combustion: nanosecond discharges and development of kinetic mechanisms[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(35): 1-34.

[2] 李鸿志. 电热化学发射技术的研究进展[J]. 南京理工大学学报, 2003, 27(5): 449-465.
LI Hong-zhi. Progress in the research of electrothermal chemical launch technology[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2003, 27(5): 449-465.

[3] 程石, 孙耀琪. 液体发射药火炮及其发展趋势[J]. 国防技术基础, 2008, 8(4): 51-55.
CHENG Shi, SUN Yao-qi. Liquid propellant gun and its development trend [J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2008, 8(4): 51-55.

[4] 莽珊珊. 整装式含能液体高压瞬态燃烧稳定性控制方法及机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
MANG Shan-shan. Control method and mechanism on high-pressure transient combustion stability of bulk-loaded liquid propellant[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.

[5] 姜冬冬, 薛晓春. 整装式液体发射药燃烧推进过程的内弹道特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 755-763.
JIANG Dong-dong, XUE Xiao-chun. Interior ballistic characteristics of combustion and propulsion process of bulk-loaded liquid propellant [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42 (4): 755-763.

[6] KUO K K, CHEUNG F B, HSIEH W H, et al. Experiments study of plasma/fluid interaction in a simulated cap gun[C]// 27th JANNAF Combustion Subcommittee Meeting. Columbia, Maryland: The Johns Hopkins University, 1990: 365-375.

[7] KUO K K, CHEUNG F B. Droplet entrainment of breakup by shear flow[R]. ARL-CR-267: 1995.

[8] 刘东尧, 周彦煌, 余永刚. 小口径电热化学超高速发射实验研究[J]. 推进技术, 1999, 20(6): 48-51.
LIU Dong-yao, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang. Experimental study on ultra-high speed launch of small aperture electrothermal chemistry [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(6): 48-51.

[9] 刘东尧, 周彦煌. 液体发射药电热化学发射内弹道一维两相流模型及数值模拟[J].爆炸与冲击, 2002, 22(2): 158-162.
LIU Dong-yao, ZHOU Yan-huang. One-dimensional two-phase flow model and numerical simulation of liquid propellant electrothermal chemical launch interior ballistics [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(2): 158-162.

[10] 周彦煌, 刘东尧, 余永刚. 非稳态等离子体射流在液体中的膨胀特性[J]. 南京理工大学学报, 2003, 20(5): 525-529.
ZHOU Yan-huang, LIU Dong-yao, YU Yong-gang. Expansion characteristics of unsteady plasma jet in liquid[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2003, 20(5): 525-529.

[11] YU Y G, YAN S H, ZHAO N. Influence of boundary shape on interaction process of plasma jet and liquid media[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010, 33(2): 541-548.

[12] 张琦, 余永刚, 陆欣, 等. 等离子射流与渐扩边界中液体工质相互作用特性的模拟实验[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(3): 311-316.
ZHANG Qi, YU Yong-gang, LU Xin, et al. Experiment on plasma-liquid interaction in a stepped-wall chamber[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(3): 311-316.

[13] LIU Y, LIN L, YU Y G, et al. Plasma-liquid interface manipulated by chamber structure: An experimental and theoretical approach[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2020, 12 (39): 44238-44247.

[14] 张琦, 余永刚, 刘东尧, 等. 脉冲等离子射流与液体工质相互作用特性实验研究及数值模拟[J]. 兵工学报, 2012, 33(5): 519-525.
ZHANG Qi, YU Yong-gang, LIU Dong-yao, et al. Experimental study and numerical simulation on property of pulsed plasma jet-liquid interaction [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33 (5): 519-525.

[15] 刘怡, 余永刚, 莽珊珊. 脉冲等离子射流在液体介质中扩展特性的测量与分析[J]. 含能材料, 2017, 25(2): 144-149.
LIU Yi, YU Yong-gang, MANG Shan-shan. Measurement and analysis of expansion characteristics of pulsed plasma jet in liquid medium[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials* (*Hanneng Cailiao*), 2017, 25(2): 144-149.

[16] 刘怡, 余永刚, 莽珊珊. 喷射压力对等离子体射流在液体中扩展的影响[J]. 兵工学报, 2018, 39(12): 2354-2362.
LIU Yi, YU Yong-gang, MANG Shan-shan. Effect of injection pressure on propagation of plasma jet in liquid[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(12): 2354-2362.

[17] 鲍立荣, 汪辉, 陈永义, 等. 硝酸羟胺基绿色推进剂研究进展[J]. 含能材料, 2020, 28(12): 1200-1210.
BAO Li-rong, WANG Hui, CHEN Yong-yi, et al. Review on hydroxylammonium nitrate based green propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials* (*Hanneng Cailiao*), 2020, 28(12): 1200-1210.

[18] 胡坤. 计算流体力学基础及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
HU Kun. Fundamentals and applications of computational fluid dynamics[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2019.

[19] 刘怡. 等离子体射流在液体介质中的扩展特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
LIU Yi. Study on the expansion characteristics of plasma jet in liquid medium[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.

[20] 莽珊珊, 余永刚. 整装式含能液体燃烧推进过程气液反应流场的数值模拟[J]. 含能材料, 2017, 25(12): 1011-1017.
MANG Shan-shan, YU Yong-gang. Simulation of gas-liquid reaction flow field for combustion and propulsion process of bulk-loaded energetic liquid[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials* (*Hanneng Cailiao*), 2017, 25(12): 1011-1017.

[21] MANG S S, YU Y G, ZHANG Q. Numerical models for interactions of ablating-capillary plasma with air and bulk-loaded liquid[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(8): 3065-3074.

[22] 刘焜, 余永刚, 倪彬. HAN基液体推进剂单滴无弧点火过程的数值模拟[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 155-160.
LIU Kun, YU Yong-gang, NI Bin. Numerical simulation for arcless electrical ignition process of single droplet of HAN-based liquid propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials* (*Hanneng Cailiao*), 2014, 22(2): 155-160.

Simulation of Spreading Characteristics of Plasma Jet in Simulative Liquid Propellant

XUE Hao-qi, YU Yong-gang

(*School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: In order to understand the ignition process of plasma jet in the liquid propellant electrothermal chemical gun, the spreading characteristics of plasma jet in simulative liquid propellant LP1846 were studied. A two-dimensional axisymmetric unsteady mathematical model of plasma jet spreading in the liquid was established, and the model was validateded with the experiments based on the liquid working medium of water. On this basis, the spreading process of plasma jet in the simulative liquid propellant LP1846 was numerically simulated. The morphological changes of plasma jet and the distribution characteristics of pressure, velocity and temperature in the jet field were analyzed. Results show that when the plasma jet expands in the simulative liquid propellant LP1846, there is turbulent mixing phenomenon due to Taylor-Helmholtz instability, and it becomes more and more intense. It is manifested by the protruding head of the jet and the axial elongation to form a tip, and the jet entrains the simulative liquid propellant medium to produce droplets in Taylor cavity, and the number of droplets gradually increases. At the same time, the necking phenomenon occurs near the nozzle hole during the expansion of plasma jet due to the simulative liquid propellant backflow. The jet field fluctuates due to the alternating action of expansion and compression waves, especially near the nozzle hole. The pressure field shows alternating distribution of high and low pressures, and the velocity field also shows similar distribution.

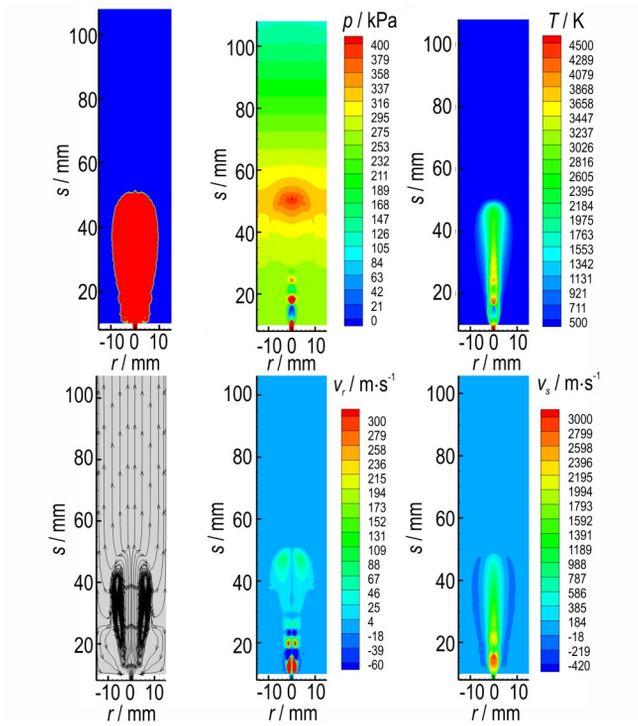
Key words: plasma jet; liquid working medium; spreading characteristics; turbulent mixing; numerical simulation; propellant

CLC number: TJ55; O64 **Document code:** A **DOI:** 10.11943/CJEM2023206

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No.51506094)

(责编: 卢学敏)

图文摘要：



A two-dimensional axisymmetric unsteady model was established to simulate the expansion process of plasma jet in simulative liquid propellant LP1846. The morphological changes during the expansion of plasma jet and the distribution characteristics of pressure, velocity and temperature in jet field were obtained.