

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.04.003

CL-20 含能墨水喷射速度仿真<sup>\*</sup>姚艺龙<sup>①</sup> 王 晶<sup>②</sup> 吴立志<sup>①</sup> 成 波<sup>①</sup> 沈瑞琪<sup>①</sup>叶迎华<sup>①</sup> 胡 艳<sup>①</sup> 朱 朋<sup>①</sup> 张 伟<sup>①</sup>

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②湖北三江航天红林探控有限公司(湖北孝感,432100)

[摘 要] 含能材料直写技术可以解决 MEMS 微起爆器中微型炸药序列的装药问题。基于 Fluent 有限元软件,建立了 CL-20 含能墨水直写喷射模型,分别模拟了直写压力、针头直径和墨水黏度等因素对 CL-20 含能墨水喷射速度的影响。模拟结果表明:随着黏度增大,喷头中流体流动速度降低,同时,速度降低的幅度变小;压力增大,喷头中流体流动速度增大,且压力与速度变化的关系为正比关系;喷头直径增大,墨水流动速度增大,且随着喷头直径的增大,墨水流动速度增幅变大。

[关键词] 含能墨水;直写技术;MEMS 微起爆器;微尺度装药;喷射速度

[分类号] TJ450

## 引言

在毫米量级乃至更小尺寸的应用环境下,如何实现 MEMS(micro-electro-mechanical system)微起爆器中传爆药柱微量炸药的精确装药,并保证炸药具有正常的起爆传爆功能,成为制约微起爆器发展的一个难题<sup>[1-5]</sup>。含能墨水直写技术利用气压或液压作用,将流动性能良好的含能墨水经微型喷嘴或微笔嘴按预先设计的模型喷射至基板表面,并通过固化或热处理等,实现含能材料的图形化沉积,获得能稳定传爆的含能膜<sup>[6-8]</sup>。将基于直写技术的 CL-20 炸药含能墨水技术应用于 MEMS 微起爆器的微尺度装药,有望解决微尺度下装药的难题<sup>[9]</sup>。

直写过程是喷管中的墨水在压力驱动下流动和快速固化过程<sup>[10]</sup>。直写压力、喷头直径和墨水黏度等因素对直写过程都有较大的影响。直写喷墨速度过快,则墨水不能及时固化,墨水线宽较大,溶剂不能及时挥发;墨水喷射速度较慢,则墨水线宽较小,难以形成爆轰,且效率较低,装药时间较长;稳定的喷墨速率为均匀线条的沉积提供保障,进而确保稳定的爆轰效果。

目前,国内外对含能墨水配方有较多的研究和报道,但是并没有对含能墨水直写过程中墨水喷射流动的规律进行研究和模拟仿真。含能墨水直写沉

积装药的均匀性决定爆轰效果,为了获得稳定的直写装药及最佳的墨水喷射条件,根据 CL-20 含能墨水直写装药参数,运用 Gambit 软件进行前处理,建立直写针管模型并进行网格划分;使用 Fluent 软件分别模拟了直写压力、针头直径和墨水黏度对直写过程墨水流动速度影响规律,为含能墨水直写装药过程提供理论指导。

## 1 喷射流动理论分析和网格模型

为更加深入、直观地了解微尺度下含能墨水在针管及针头中的流动、喷射过程及流速分布,使用 Fluent 软件建模并进行数值模拟。

在宏观流体力学中涉及到 3 个守恒方程<sup>[11-12]</sup>。

1) 连续性方程。连续性方程是质量守恒原理在流体力学中的表现形式。微分形式的欧拉型连续方程为:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (1)$$

含能墨水为不可压缩流体<sup>[11]</sup>,故  $d\rho/dt = 0$ ,从而含能墨水的连续性方程可写为:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (2)$$

由于  $\rho = 0$ ,含能墨水连续性方程还可以写为:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \text{ 或 } \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0. \quad (3)$$

\* 收稿日期:2010-01-28

基金项目:总装备部预先研发项目

作者简介:姚艺龙(1990-),男,硕士,研究生,主要从事含能墨水直写的研究。E-mail:741708306@qq.com

通信作者:吴立志(1982-),男,硕导,讲师,主要从事激光与物质相互作用机理、含能材料的快速成型(直写)技术和爆炸物理测试分析技术的研究。

E-mail:wulizhi82@163.com

2) 动量方程。动量方程是在流体运动中各部分流体微元的动量保持守恒。微分形式的欧动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{u})}{\partial t} = \rho \boldsymbol{f} - \nabla \cdot \boldsymbol{\pi}.$$
 (4)

式中: $\rho$  为流体的密度; $t$  为时间; $\boldsymbol{u}$  为速度向量; $\boldsymbol{f}$  为单位质量力。

3) 能量方程。能量方程是能量守恒原理在流体力学中的体现。忽略体积力,能量方程为:

$$\rho \frac{d\boldsymbol{u}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \boldsymbol{u}.$$
 (5)

在上述 3 个方程的基础上,对含能墨水喷射流动模型进行必要的假定,并在 Fluent 中选择相应的基本选项,建立所需的数值模型。主要假定有<sup>[13]</sup>:

- 1) 无压缩牛顿流体,不考虑重力作用;
- 2) 由于含能墨水为轴对称流动,以二维流动模型代替空间模型;
- 3) 使用绝对速度方程;
- 4) 梯度选项基于 Green-Gauss Cell;
- 5) 黏度选项选用 Laminar 模型;
- 6) 动量离散形式基于二阶迎风式(second order upwind),将残差收敛标差标准设为  $1 \times 10^{-6}$ 。

运用 Gambit 软件,根据实际针筒和喷头尺寸建立二维针筒和喷头模型,建立模型时忽略喷管以及针头壁厚,并选择面网格中的四边形网格形式对模型进行网格划分,对模型进行边界条件设定。喷管和喷管网格模型见图 1。

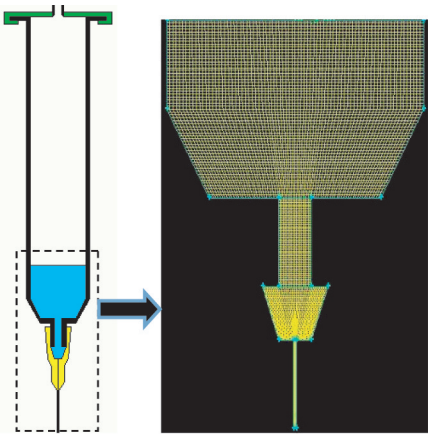


图 1 含能墨水直写喷管和喷管网格模型  
Fig. 1 Nozzle and nozzle mesh model of energetic ink used in direct writing

2 结果与分析

2.1 直写墨水黏度对流动特性影响

CL-20 炸药含能墨水由 CL-20 炸药( $d_{50}$  约 300 nm)、黏结剂体系(包括黏结剂和溶剂)和其他添加

物组成,其中黏结剂与溶剂的配比、CL-20 炸药含量对墨水黏度都有较大的影响。为了解黏度不同时墨水的流动情况,选用内径为 0.2 mm 的喷头,压力为 100 kPa 不变,模拟黏度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 Pa·s 和 2.5 Pa·s 时墨水流动的状况。

图 2 分别为 1.0、1.5、2.5 Pa·s 时针筒和喷头

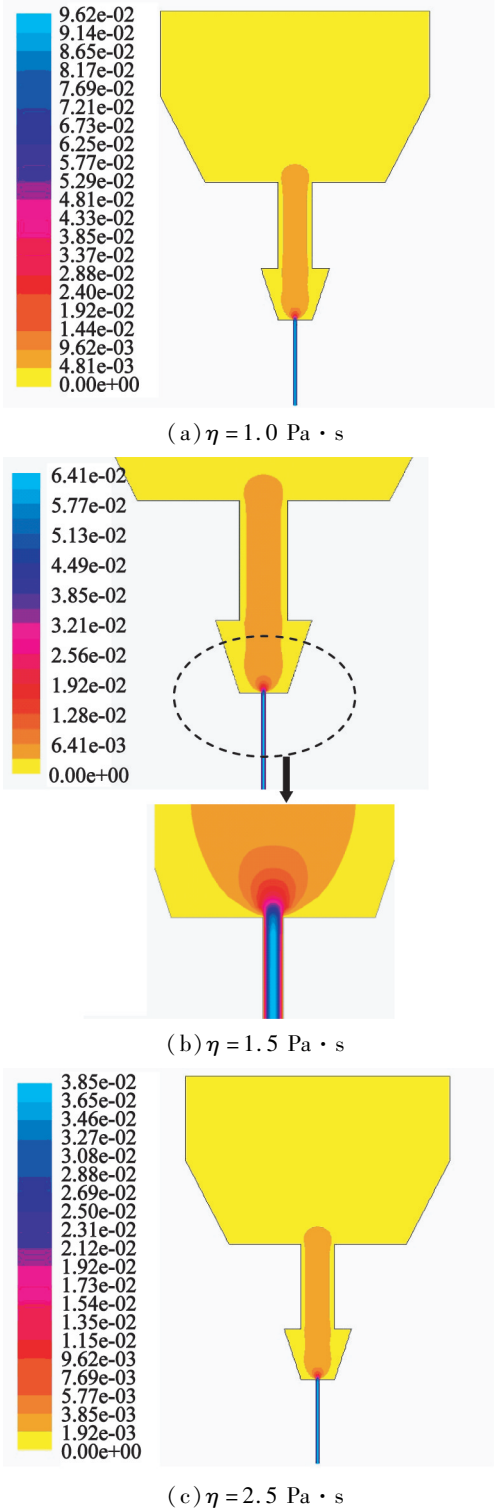


图 2 不同黏度时含能墨水速度的分布云图  
Fig. 2 Velocity distribution of energetic ink with different viscosities

中墨水速度分布云图。读取 5 种黏度下所模拟的流体在喷头中的最大流动速度进行对比,并以黏度为横坐标、流体在喷头中的最大速度为纵坐标,得到黏度和速度的关系曲线,如图 3 所示。

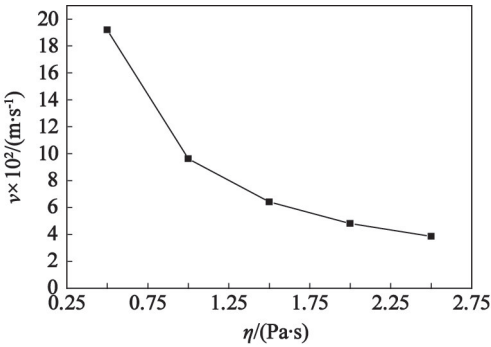


图 3 黏度与喷头中墨水喷射速度的关系

Fig. 3 Relationship between viscosity and jet velocity of energetic ink

由图 3 可知,黏度增大,喷头中流体流动速度降低;且黏度较小时,曲线斜率较大,故黏度越小,速度随黏度变化得越快。这是由于含能墨水本身具有黏性,墨水流动时因产生内摩擦力而消耗能量,同时针管内壁也会阻碍墨水流动。在其他条件一致,改变墨水黏度,随着黏度增大,墨水流动能量损耗增加,墨水流动速度降低。

2.2 直写压力对墨水流动特性影响

含能墨水直写是利用气压(氮气)作用将喷管腔内 CL-20 墨水挤出喷头,以挤压涂覆的方式在系统控制单元的控制下将墨水直接沉积到基板上。故含能墨水直写喷管压力的改变,对直写效果有显著的影响,且调整直写喷管压力达到直写要求也是最方便和常用的方法。为了解压力与直写线宽的关系,选用内径为 0.2 mm 的喷头,且墨水黏度、密度不变,模拟压力分别为 50、100、150、200、250 kPa 时墨水流动的状况。

图 4 分别为 100 kPa 和 200 kPa 下针筒和喷头中墨水速度分布图。读取 5 种压力下所模拟的流体在喷头中的最大流动速度进行对比,并以压力为横坐标、流体在喷头中的最大速度为纵坐标绘制压力和速度关系曲线,得到图 5。

通过图 5 可知,随着压力增大,喷头中流体流动速度增大。将 5 种压力下所得到的速度点拟合,得到一条直线,故压力与速度变化的关系为成正比关系。

2.3 不同喷头直径下墨水流动数值模拟

喷头直径大小对直写墨水流动有较大的影响,为了解喷头直径与墨水流动关系,将压力固定为 100 kPa,墨水黏度、密度不变,模拟喷头直径分别为

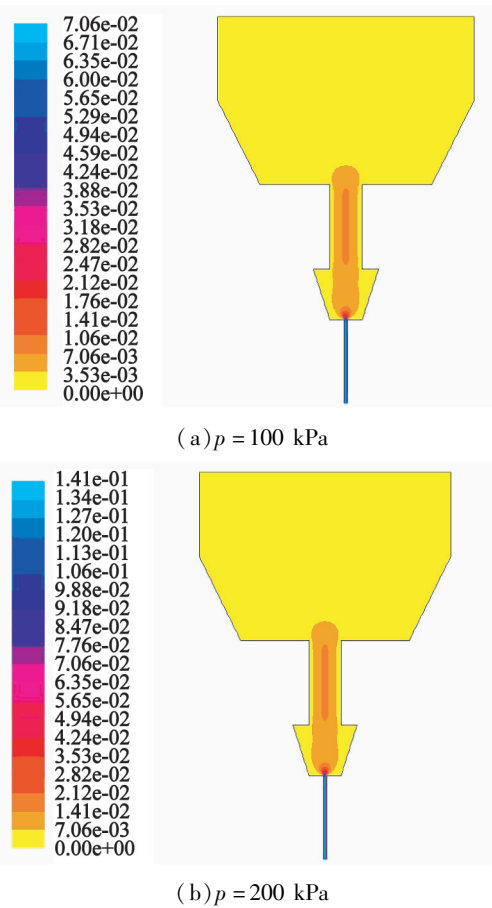


图 4 不同压力下含能墨水速度的分布云图

Fig. 4 Velocity distribution of energetic ink under different pressures

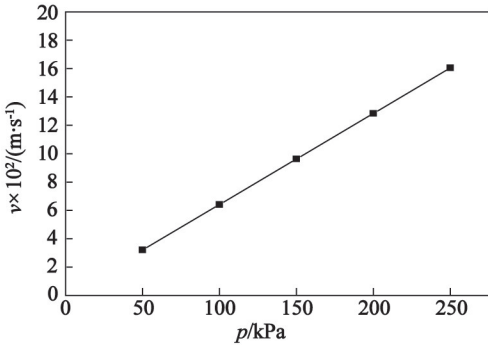


图 5 压力与喷头中墨水喷射速度的关系

Fig. 5 Relationship between pressure and jet velocity of energetic ink

0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.33、0.41 mm 时墨水流动的状况。

图 6 分别为 0.25 mm 和 0.33 mm 下针筒和喷头中墨水速度分布图。读取 5 种喷头下所模拟的流体在喷头中的最大流动速度进行对比,并以喷头直径为横坐标、流体在喷头中的最大速度为纵坐标绘制喷头直径和速度关系曲线,从而了解喷墨打印时喷头直径与速度的关系,如图 7 所示。

由图 7 可知,喷头直径增大,墨水流动速度增大,

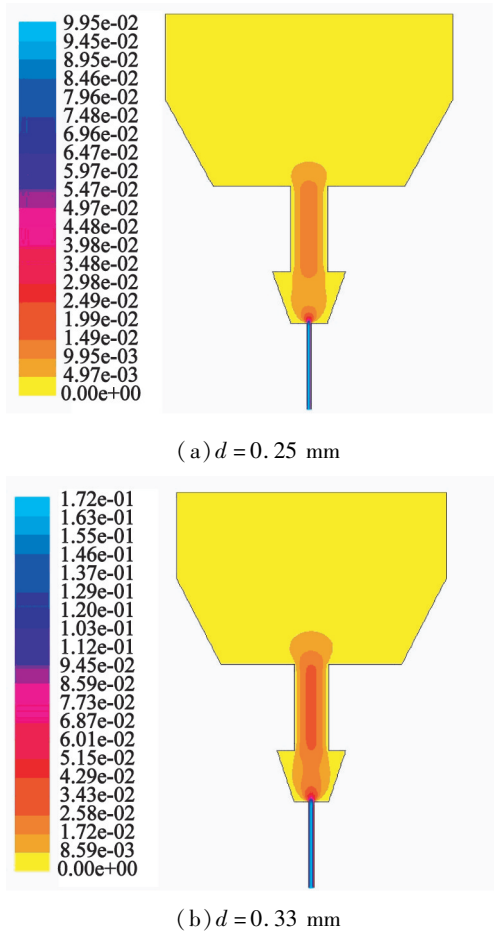


图 6 不同喷头直径时含能墨水速度的分布云图

Fig. 6 Velocity distribution of energetic ink in nozzles with different diameters

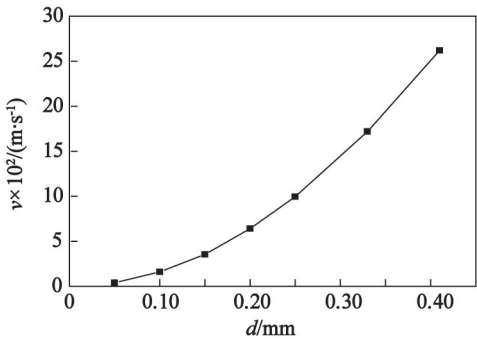


图 7 喷头直径与喷头中墨水喷射速度关系

Fig. 7 Relationship between nozzle diameter and jet velocity of energetic ink

且随着喷头直径的增大,曲线斜率增大,则墨水流动速度变化增大。这是由于墨水存在一定的黏度,喷头直径越小,墨水流动针管壁面对流体作用越大。

3 结论

针对 MEMS 微起爆序列,利用 Fluent 软件平台模拟了含能墨水黏度、直写压力、喷头直径等因素对直写喷射速度的影响,结果显示:

1) 含能墨水黏度主要由黏结剂和溶剂的比例

决定。黏结剂比例越高,黏度越大,喷头中墨水流动速度降低,且黏度较大时,曲线斜率较小;故黏度越大,速度随黏度变化得越慢。

2) 含能墨水直写是在氮气压力驱动下,使墨水从喷管中流出;增大氮气压力,喷头中流体流动速度增大,并且压力与速度变化的关系为正比关系。

3) 直写喷管针头直径是影响喷射墨水流动的重要因素。模拟仿真结果表明,喷头直径增大,墨水流动速度增大,且随着喷头直径的增大,曲线斜率增大,则墨水流动速度变化增大。

研究结果对含能墨水直写技术的工艺优化具有一定指导意义,对含能墨水直写技术在 MEMS 微起爆序列中的工程化应用起到了积极的推动作用。

参 考 文 献

[1] GATES R. Navy overview[C]//NDIA'S 54th Annual Fuze Conference. USA;2010.

[2] COPE R. Navy overview[C]//NDIA'S 55th Annual Fuze Conference. USA;2011.

[3] CLESCA O. Next generation fuzing for next generation weapons[C]//The 56th Annual Fuze Conference. Baltimore;2012.

[4] PIQUE A, CHRISEY D B. Direct-write technologies for rapid prototyping applications: sensors, electronics, and integrated power sources[M]. USA: Academic Press, 2002: 1-5.

[5] CAMPAGNUOLO C J. Insensitive munition solutions for anti-structure munition grenade[C]//The 56th Annual Fuze Conference. Baltimore;2012.

[6] JOHNSON L H. Precision guidance kit[C]//The 56th Annual Fuze Conference. Baltimore;2012.

[7] MEISSNER C. Materials by design[J]. Designer Materials,2012.

[8] CHURCH K H, FORE C, FEELEY T. Commercial applications and review for direct write technologies[C]//MRS Proceedings. UK:Cambridge University Press,2000.

[9] 朱自强,陈瑾,谯志强,等. CL-20 基直写炸药油墨的制备与表征[J]. 含能材料,2013,21(2):235-238.

ZHU Z Q, CHEN Q, QIAO Z Q, et al. Preparation and characterization of direct write explosive ink based on CL-20[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(2):235-238.

[10] 邢宗仁. 含能材料三维打印快速成形技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2012.

XING Z R. Research of three-dimensional printing for energetic materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2012.

[11] 刘文辉. 背叶片对离心泵内部流场影响研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.

(下转第 21 页)



- [6] 李志平,魏运洋,吕春绪,等. 二并呋嗪的合成与硝化研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),1997,21(3):245-248.
- LI Z P, WEI Y Y, LÜ C X, et al. Study on the synthesis and nitration of tetraazadecalin[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology(Science and Technology),1997,21(3):245-248.
- [7] 蔡春,吕春绪. 五氧化二氮硝解合成 1,4,5,8-四硝基-1,4,5,8-四氮杂双环[4.4.0]癸烷[J]. 火炸药学报,2005,28(2):50-51.
- CAI C, LÜ C X. Nitrolysis with nitrogen peroxide for synthesis of 1,4,5,8-tetranitro-1,4,5,8-tetraazabicyclo[4.4.0] decalin[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2005,28(2):50-51.
- [8] 蔡春,吕春绪. 1,4,6,9-四硝基-1,4,6,9-四氮杂双环[4.4.0]癸烷的合成新方法[J]. 火炸药学报,1999,22(1):17-18.
- CAI C, LÜ C X. A new method for the synthesis of 1,4,6,9-tetranitro-1,4,6,9-tetraazabicyclo[4.4.0] decane [J]. Chinese Journal of explosives & propellants,1999,22(1):17-18

## Improved Synthesis Technology of 1,4,5,8-Tetranitro-1,4,5,8-Tetraazabicyclo[4.4.0] Decalin

DING Feng, LU Tingting, ZHANG Lijie, WANG Wei, JI Yueping

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] A new method for the synthesis of 1,4,5,8-tetranitro-1,4,5,8-tetraazabicyclo[4.4.0]decalin (TNAD) was studied. This compound was prepared from the raw material 1,4,5,8-tetraazabicyclo[4.4.0]decalin (THAD) via salt-forming reaction and nitrolysis. The total yield could reach as high as 90%, and the purity is 98.7%. Structure of the product was characterized by IR, <sup>1</sup>H NMR and elemental analysis. The effects of nitrification system, reactant ratio, reaction temperature and reaction time on the yield have been investigated. Results show that the optimum reaction conditions of the reaction are determined as:  $n(\text{THAD} \cdot 4\text{HNO}_3) : n(98\% \text{HNO}_3) : n(\text{AC}_2\text{O}) = 1 : 24 : 15$ . Meanwhile, the best reaction temperature is 25 °C and the best reaction time is 2 h.

[KEYWORDS] organic chemistry; 1,4,5,8-tetranitro-1,4,5,8-tetraazabicyclo[4.4.0]decalin (TNAD); salt-forming reaction; nitrolysis;  $\text{HNO}_3/\text{AC}_2\text{O}$

(上接第 17 页)

LIU W H. Research on the effect of black blade on internal flow field of centrifugal pump[D]. Hefei: Hefei University of Technology,2012.

- [12] 房玉强. 基于微流控芯片的微混合技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2012.

FANG Y Q. Analysis of mixing technique based on microfluidic chip[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2012.

- [13] 王建. 化学芯片的喷墨快速成型技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.

## Jet Flow Simulation of CL-20 Energetic Ink

YAO Yilong<sup>①</sup>, WANG Jing<sup>②</sup>, WU Lizhi<sup>①</sup>, CHENG Bo<sup>①</sup>, SHEN Ruiqi<sup>①</sup>, YE Yinghua<sup>①</sup>, HU Yan<sup>①</sup>, ZHU Peng<sup>①</sup>, ZHANG Wei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

<sup>②</sup>Honglin Detective & Control Co., Ltd., Hubei Sanjiang Space (Hubei Xiaogan, 432100)

[ABSTRACT] CL-20 energetic ink basing on direct writing technology was applied for micro-charge of the micro-detonation sequence of MEMS micro-initiators. Direct writing of CL-20 energetic ink is the ink flow driven by nozzle pressure and rapid solidification. Direct writing pressure, needle diameter and ink viscosity had great influence on this process. In order to study the effect of these influence factors on jet velocity of CL-20 energetic ink, a simulation model of direct writing jet of CL-20 energetic ink was set up. Fluent, a numerical simulation software was applied to simulate the change of ink jet velocity under the different pressure, needle diameter and ink viscosity. Simulation results show that the fluid velocity in nozzle increased proportionally when the pressure rose. Moreover, the ink viscosity increased while the velocity fell and its range decreased. With the increase of nozzle diameter, the ink velocity rose and its range augmented.

[KEYWORDS] energetic ink; direct writing; MEMS micro-initiators; micro-charge; jet velocity