

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.002

# 溶液属性对电流体动力学喷印的影响研究

吴海忠<sup>1,2</sup>, 陈洪立<sup>1,2,3\*</sup>, 乔欣<sup>4</sup>

- (1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018;  
2. 浙江理工大学现代纺织装备技术教育部工程研究中心, 浙江 杭州 310018;  
3. 新疆大学科学技术学院机电工程系, 新疆维吾尔自治区阿克苏 843100;  
4. 浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**为研究电流体电喷印中流体动力黏度、表面张力及电压等参数对喷印过程的影响,在前人对电流体动力学理论分析的基础上以质量分数为10%~20%的聚氧化乙烯为模拟材料,采用多物理场耦合软件COMSOL构建电流体动力学数学模型进行仿真验证。在电场力、液体内部黏性力和表面张力的作用下泰勒锥保持平衡,当电场力大于液体表面张力和黏性力时,液体破碎喷印形成锥射流。液体表面张力和动力黏度越大,喷印所需电场力就越大,相应时间锥射流的形成也就越慢。

**关键词:**电流体动力学;电喷印;动力黏度;表面张力;多物理场耦合软件COMSOL;锥射流

中图分类号:O361.4;TB115.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)05-0009-05

## Effect of Solution Properties on Electro-Hydro Dynamic Printing

WU Haizhong<sup>1,2</sup>, CHENG Hongli<sup>1,2,3\*</sup>, QIAO Xin<sup>4</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;  
2. Engineering Research Center of Modern Textile Machinery & Technology of Education Ministry, Hangzhou 310018, China;  
3. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang University Institute of Science and Technology, Akesu, Xinjiang Uygur Autonomous Region 843100, China; 4. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at investigating the effects of hydrodynamic viscosity, surface tension, voltage and other parameters on the printing process in the electro-jet printing of electrofluid, polyethylene oxide with mass fraction of 10% to 20% was used as the simulation material based on the previous theoretical analysis of electro-hydro dynamics. The multi-physics coupling software COMSOL was used to construct the mathematical model of electro-hydro dynamics for simulation verification. The Taylor cone maintains its balance under the influence of the electric field force, the internal viscous force of the liquid and the surface tension. When the electric field force is greater than the liquid surface tension and the viscous force, the liquid breaks and prints to form a cone jet. The greater the surface tension and dynamic viscosity of the liquid, the greater the electric field force required for jet printing, and the slower the formation of the corresponding cone jet.

**Keywords:** EHD (electro-hydro dynamics); electro-jet printing; dynamic viscosity; surface tension; multi-physics coupling software COMSOL; cone jet

电流体动力学 (electro-hydro dynamics, EHD) 打印是一种新型聚合物金属纳米颗粒复合材料的3D打印方法,属于纳米材料溶液打印,是目前转增制造研究

中的重点发展领域之一<sup>[1]</sup>。顾名思义,聚合物金属纳米颗粒复合材料是在聚合物中添加了纳米金属颗粒,从而提升了材料的各种物理化学性质(磁性、介电性

收稿日期:2018-04-14;修回日期:2018-06-20

基金项目:浙江省自然科学基金(LY18E050025)。

第一作者简介:吴海忠(1993),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要研究方向为电流体动力学打印。通信作者:陈洪立(1980),男,山东曲阜人,副教授,主要从事机电一体化技术研究。E-mail:chenhldr@zstu.edu.cn

和光电等超功能),应用领域相当广泛,如可穿戴设备<sup>[2]</sup>、柔性电子器件<sup>[3]</sup>、生物医疗<sup>[4]</sup>和微纳机电系统<sup>[5]</sup>等。相比于传统的微尺度制造技术,在成本和生产效率方面,电流体动力学打印有着无可比拟的优势。另外,在制造材料的选择和生产的周期上,电流体动力学打印克服了传统制造工艺如铸造、锻造等在温度、模具加工和可成形性等方面的限制,可采用多种多样的打印溶液,这其中包括单一聚合物溶液、聚合物纳米金属复合溶液及聚合物金属氧化物溶液<sup>[6]</sup>等。

近年来,电流体动力学的研究在国内外已经获得了无数令人振奋的成果。2014 年 2 月,美国哈佛大学采用电流体动力学微尺度打印出带完整毛细血管活性组织,证明了电流体技术在医疗生物领域的可行性<sup>[7]</sup>。2014 年 6 月,麻省理工学院的研究人员采用电流体动力学技术研制出了一种超轻超硬的材料,据了解,该材料可以承受远远高于自身质量的负荷,在航空航天、汽车制造等领域将有极大的应用前景<sup>[8]</sup>。然而,由于电流体动力学打印机理相对复杂,要做到对喷印的精密控制还是具有相当大的难度,对电流体动力学的数值模拟也一直是国内外研究的热点,其中以模拟泰勒锥<sup>[9]</sup>和锥射流的成型为重要研究方向。

国内方面,王军锋等通过 VOF 耦合 Level set 方法,将电场力作为一个面力加入流体方程中对静电场下的锥射流进行了模拟<sup>[10]</sup>。危卫等<sup>[11]</sup>则是通过 VOF 耦合相场方法,模拟了锥射流的形成,他们还考虑了沉积的带点液滴对喷印的影响。杨建军等<sup>[12]</sup>通过多物理场耦合软件 COMSOL,将电场力作为体积力加入  $N-S$  方程中,研究了入口压力,电压等参数对锥射流喷射性能的影响。国外方面,Collins 等<sup>[13]</sup>根据  $N-S$  方程,以模拟电场作用下液面的变化为出发点,模拟了泰勒锥演化为锥射流的过程。Lastow 等<sup>[14]</sup>通过将 FLUENT 软件中的热场方程改为静电场方程,将电场力作为体积力添加到  $N-S$  方程源项中去来模拟锥射流的形成。

## 1 电流体动力学基本原理分析

### 1.1 工作原理

电流体动力学打印工作原理如图 1 所示。在喷嘴和基板之间施加高压电,喷嘴底部半月形液滴在电场下表面产生电荷,这些电荷在电场的作用下在液滴表面移动,导致液滴表面产生切应力,形成著名的泰勒锥,随着电场强度的增大,电荷所受的电场力克服液体表面张力,形成纳米级射流。

### 1.2 泰勒锥受力分析

泰勒锥受力分析图如图 2 所示,其中  $F_{es}$  为电场

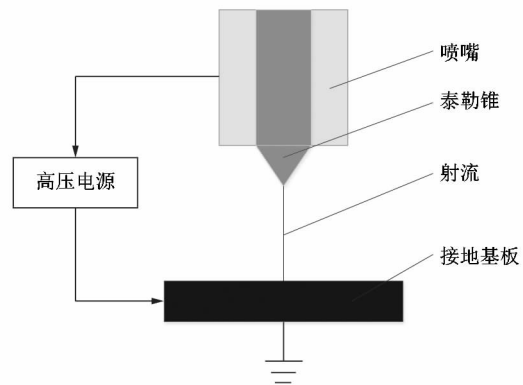


图 1 电流体动力学打印原理图  
Figure 1 Schematic diagram of basic principle of E-jet printing

力,  $F_{st}$  为溶液表面张力,  $F_{\mu}$  为液体黏性力,  $F_N$  为锥面法相电场力,  $F_T$  为锥面切向电场力。在静电场情况下,液体表面电荷主要受到电场力  $F_{es}$  和液体表面张力  $F_{st}$  以及液体内部黏性力  $F_{\mu}$  的作用;在施加正电压的情况下,锥面正电荷沿着液体表面向下移动,因而带动液体外表面的流动。正向电荷不断在液滴底部中心汇聚,中心处所受电场力随着电荷的积聚而越来越大,将半圆形液面不断拉伸成锥形,最终电场力  $F_{es}$  突破表面张力  $F_{st}$  和黏性力  $F_{\mu}$  的控制,在液滴尖端形成锥射流。

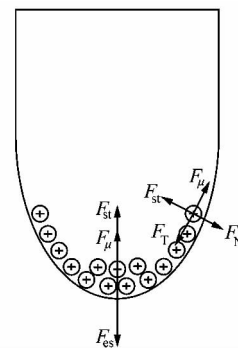


图 2 泰勒锥受力分析图  
Figure 2 Force diagram of Taylor cone

## 2 有限元数值模拟

在多物理场耦合分析软件 COMSOL Multiphysics 5.2 中,使用 AC/DC 模块中的静电接口和层流两相流的相场接口建立多物理场耦合模型。在 COMSOL 中,定义好静电模块与层流模块,在层流两相流相场法接口中,其流体运动方程定义为:

$$\rho_r(u_c \cdot \nabla) u_c = \nabla \cdot [-p_c I + \mu_r(\nabla \cdot u_c + (\nabla \cdot u_c)^T)] + F_{st} + \rho_r g + F; \tag{1}$$

$$\nabla \cdot u_c = 0. \tag{2}$$

式中: $\rho_r$  为溶液的密度; $u_c$  为溶液的速度; $p_c$  为压强; $I$  为电流; $g$  为重力加速度; $\mu_r$  为溶液黏度; $F_{st}$  为溶液表面张力; $F$  为附加的体积力。

在 AC/DC 模块中,静电场接口模块控制方程定义为:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla U) = 0; \quad (3)$$

其中,  $\varepsilon_r = \varepsilon_{rf} V_f + \varepsilon_{rg} V_g$  (4)

式中: $U$  为电势; $\varepsilon_0$  为真空介电常数; $\varepsilon_r$  为相对介电常数; $\varepsilon_{rf}$  为溶液的相对介电常数; $V_f$  为两相流界面中打印溶液的体积; $\varepsilon_{rg}$  为空气的相对介电常数; $V_g$  为两相界面中液体的体积分。

$$T = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \varepsilon_r E_x^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (E_x^2 + E_y^2) & \varepsilon_0 \varepsilon_r E_x E_y \\ \varepsilon_0 \varepsilon_r E_x E_y & \varepsilon_0 \varepsilon_r E_y^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (E_x^2 + E_y^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $E_x$  为  $x$  方向电场力分量, $E_y$  为  $y$  方向电场力分量。

### 2.1 几何模型和边界条件

电流体动力学打印的基本原理为在喷嘴与基板之间施加高压,相对较为简单,为了减少计算时间,文中采用二维模型来进行模拟计算。在 COMSOL 中的几何模型如图 3 所示,其中, A 为喷嘴管壁, B 为流体, C 为空气, h 为底部接地基板。其中喷嘴内径为 0.6 mm, 外径 1.4 mm, 高度 1.0 mm, 喷嘴底部距离基板 1.0 mm。

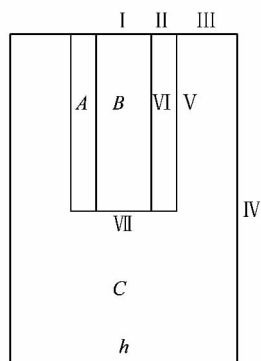


图 3 模型的几何条件

Figure 3 Geometry conditions of model

初始打印溶液采用自定义乙醇材料,具体参数如表 1 所示。设置其电导率为  $1.07 \times 10^{-4}$  S/m, 相对介电常数为 30.7, 表面张力为 0.07 N/S, 黏度为  $17 \times 10^{-3}$  Pa · s, 密度为 1 000 kg/m<sup>3</sup>。

考虑到计算效率的问题,采用手动划分网格,喷嘴管壁 A 区由于不参与流场计算,采用粗化形式来绘

笔者借鉴前人的经验,将电场力作为体积力添加到  $N-S$  方程中来实现电场和流场的耦合,即式(1)中  $F = f_e$ 。根据麦克斯韦张量可知:

$$f_e = \nabla \cdot T \quad (5)$$

其中,  $T = ED^T - \frac{1}{2}(E \cdot D)I$ ;

$$E = -\nabla \cdot U;$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$$

式中: $T$  为麦克斯韦应力张量, $E$  为电场强度, $D$  为电位移矢量。

在二维平面中,麦克斯韦应力张量用矩阵表示为:

制, B, C 区采用较细密的网格,设置最大单元尺寸为 14  $\mu$ m, 最小单元尺寸为 1.4  $\mu$ m, 最大单元增长率采用默认的 1.13, 最终得到域内单元 26 432 个, 边界单元 723。采用瞬态求解器,以  $5 \times 10^{-4}$  的时间步长计算。边界条件如表 2 所示。

表 1 流体在 20 °C 时的性质

Table 1 Basic properties of fluid at 20 °C

流体名称	相对介电常数	动力黏度 $\times 10^{-3}/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
乙醇	30.7	17.000 0	1 000.00
空气	1.0	0.017 9	1.29

表 2 模型几何尺寸及边界条件

Table 2 Geometry dimensions and boundary conditions of model

边界	两相流边界	电势
I	入口压力, $p = 100$ Pa	$U$
II	速度 $u = 0$ mm/s	$U$
III	开边界, $p = 0$ Pa	0
IV	开边界, $p = 0$ Pa	0
V	无滑移, $u = 0$ mm/s	$U$
VI	无滑移, $u = 0$ mm/s	$U$
VII	两相初始界面, $p = 0$ Pa	0

### 2.2 模拟结果与分析

首先,在喷嘴与基板之间添加 5 000 V 电势  $U$ , 入口压力设置为  $p = 100$  Pa, 模拟在 0.00 ~ 0.02 s 内静电场下锥射流的形成;然后,探究不同动力黏度以及表面张力等打印液体参数对电流体喷印的影响规律。

#### 2.2.1 锥射流形成

电流体动力学打印锥射流随时间形成过程如图 4

所示。从图中可知,初始阶段,喷嘴底部形成半月形液滴;由于喷嘴底部液滴表面上电荷的不断积累,电场力逐渐增强,液滴中心在电场力和表面张力的作用下被缓缓拉长,在 8.0 ms 左右时形成著名的泰勒锥;此时液滴尖端在电场力和表面张力以及内部黏性力的作用下保持平衡,液滴内部中心形成向上回流,当电荷进一步积聚,电场力则会突破液滴表面张力和黏性力形成射流。

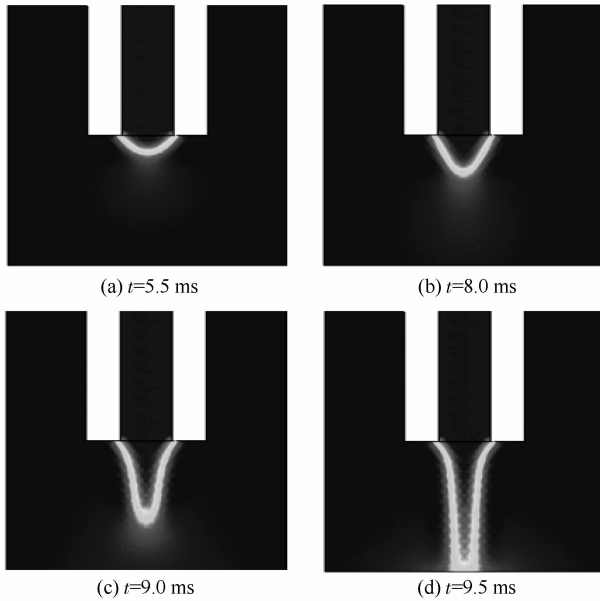


图 4 锥射流形成模拟图

Figure 4 Simulated diagram of fluid form varying with time

### 2.2.2 表面张力

在工作电压为 5 000 V,入口压力为 100 Pa,动力黏度为  $17.3 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,时间  $t = 0.05 \text{ s}$  时,不同表面张力( $\sigma$  为 0.02,0.05,0.07 和 0.09 N/s 时)的液体的喷印状态如图 5 所示。可以明显观察到,在表面张力为 0.02 N/s 时,液体在电场力的作用下已经喷印到基板处,液体表面张力越大,锥射流形成所需要的电场力越大,同一时间下,喷印而出的液体也越少。

### 2.2.3 动力黏度

电压为 5 000 V,入口压力  $p = 100 \text{ Pa}$ ,液体表面张力为 0.07 N/s,时间为 0.08 s 时,不同动力黏度( $\mu$  为  $15 \times 10^{-3}$ ,  $17 \times 10^{-3}$ ,  $20 \times 10^{-3}$  和  $25 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )的液体的喷印状态如图 6 所示。由理论分析可知,电流体喷印需要电场力克服液体表面张力和内部黏性力,打印液体黏度越高,形成锥射流所需要的电场力也就越大。所以,同一条件下,黏度越大的液体在同一时间的锥形就越短,这与本次模拟结果一致。

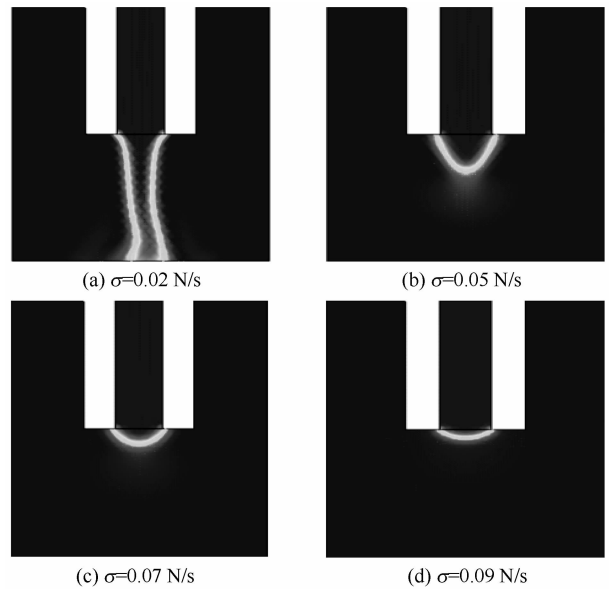


图 5 不同表面张力打印液体在 0.05 s 喷印状态  
Figure 5 Jet printing states of solution with different tension at 0.05 s

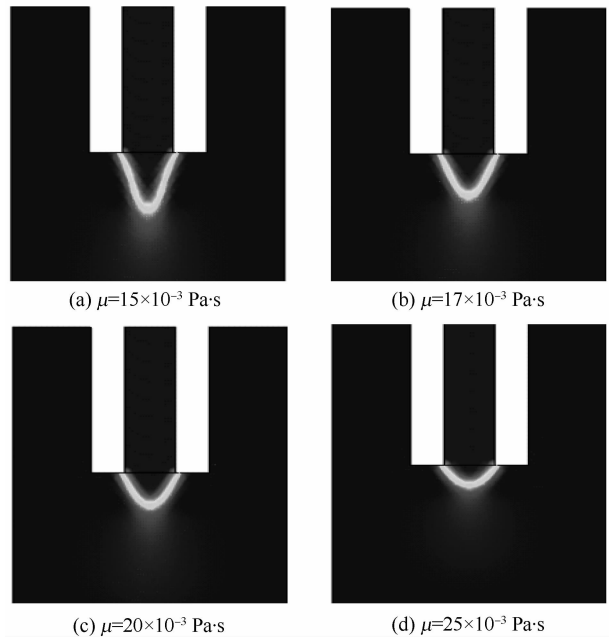


图 6 不同动力黏度液体在 0.08 s 喷印状态  
Figure 6 Jet printing states of solution with different dynamic viscosity at 0.08 s

## 3 结论

简要分析了电流体动力学打印的工作机理和泰勒锥阶段锥体的受力,利用前人对电流体喷印数值模拟的经验,构建电流体动力学喷印数值计算模型,模拟了不同打印溶液的表面张力和液体动力黏度对喷印状态的影响,分析并总结其规律。根据模拟结果分析,当液

体表面张力较小时,液体表面快速破碎,不能形成泰勒锥;而当表面张力过大时,需要较大的电场力来突破张力的阻碍形成射流。同样,液体动力黏度的增大使同一时间下所形成锥形变短,即形成射流所需的电场力更大。综上所述,打印溶液的相关属性对电流体动力学打印有较大影响,配置合理的打印溶液对电流体动力学打印至关重要。

#### 参考文献:

- [1] FARAHANI R D, DUBE M, THERRIAULT D. Three-dimensional printing of multifunctional nanocomposites: manufacturing techniques and applications [J]. *Advanced materials*, 2016, 28(28): 5798.
- [2] GAO Wei, EMAMINEJAD S, NYEIN H Y Y, et al. Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis [J]. *Nature*, 2016, 529: 509.
- [3] PARK H G, BYUN S U, JEONG H C, et al. Photoreactive spacer prepared using electrohydrodynamic printing for application in a liquid crystal device [J]. *Ecs solid state letters*, 2013, 2(12): 53.
- [4] AHN S H, LEE H J, KIM G H. Polycaprolactone scaffolds fabricated with an advanced electrohydro-dynamic direct-printing method for bone tissue regeneration [J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(12): 4257.
- [5] CHEN D, LIANG J J, PEI Q B. Flexible and stretchable electrodes for next generation polymer electronics: a review [J]. *Science China chemistry*, 2016, 59(6): 660.
- [6] JANG S, KIM Y, OH J H. Influence of processing conditions and material properties on electrohydrodynamic direct patterning of a polymer solution [J]. *Journal of electronic materials*, 2015, 45(4): 2292.
- [7] LEWIS J A, AHN B Y. Device fabrication: three-dimensional printed electronics [J]. *Nature*, 2015, 518(7537): 42.
- [8] DERBY B. Printing and prototyping of tissues and scaffolds [J]. *Science*, 2012, 338(6109): 922.
- [9] TARLOR G. Disintegration of water drops in an electric field [J]. *Proceedings of the royal society: series A mathematical and physical sciences*, 1964, 280(1382): 383-397.
- [10] 王军锋, 左子文, 霍元平. 液滴演化及静电场下锥射流形成的数值模拟 [J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(4): 668.
- [11] 危卫, 张云伟, 顾兆林. 电场作用下电流变液滴的变形及力学行为 [J]. *科学通报*, 2013, 58(3): 199.
- [12] 杨建军, 张志远, 兰红波, 等. 基于 EHD 微尺度 3D 打印喷射机理与规律研究 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 401.
- [13] COLLINS R T, JONES J J, HARRIS M T, et al. Electrohydrodynamic tip streaming and emission of charged drops from liquid cones [J]. *Nature physics*, 2008, 4(2): 149.
- [14] LASTOW O, BALACHANDRAN W. Numerical simulation of electrohydrodynamic (EHD) atomization [J]. *Journal of electrostatics*, 2006, 64(12): 853.

(上接第 8 页)

过谐振响应和导纳分析看出了优化后的换能器性能有了一定的提升,说明此次优化是成功的,另外由于后盖板重金属材料的减少一定程度上减轻了整个换能器的质量,为今后换能器的设计提供了一定的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 陈思颖. 中国各地区废水排放情况统计及预测 [J]. *环境与生活*, 2014(14): 94-96.
- [2] 孙建丽, 刘廷华. 压电高聚物材料的发展及应用 [J]. *塑料工业*, 2005, 33(增刊): 46-48.
- [3] 曾凡冲. 超声换能器的设计理论研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2013: 3.
- [4] 蓝宇, 王智元, 王文芝. 应用有限元软件进行换能器的优化设计 [C] // 中国声学学会 2001 青年学术会议. 上海: 中国声学学会, 2001: 335-337.
- [5] LI Qi, ITO K, WU Zhishen, et al. COMSOL Multiphysics: a novel approach to ground water modeling [J]. *Groundwater*, 2009, 47(4): 480-487.
- [6] 梁松. 夹心式压电超声换能器设计及其振动性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011: 18-20.
- [7] 常子原. 夹心式纵向压电换能器的结构设计和声学特性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 12.
- [8] 林书玉. 超声换能器的原理及设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 91-98.
- [9] 冯若. 超声手册 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 218-219.
- [10] 左斌, 邵华. 高 QM 值夹心式压电超声换能器的设计 [J]. *机械设计与研究*, 2013, 29(2): 26-28.
- [11] 霍树青, 高长水. 夹心式换能器设计中节面位置的选择与分析 [J]. *电加工与模具*, 2009(2): 47-49.
- [12] ZHANG Jiguo. Applications of 1stOpt in data treatment of chemical engineering experiment [J]. *Guangdong chemical industry*, 2013, 40(23): 206-207.
- [13] 王秋萍, 任金莲, 牛勇, 等. 不同直径金属杆中纵向振动声速研究 [J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(2): 49-51.
- [14] 李响, 马希直. AIN 压电薄膜换能器性能的仿真研究 [J]. *压电与声光*, 2017, 39(5): 649-653.