

# 离子液体改性燃料的电流体动力学效应研究

戚晗轩<sup>1</sup>, 李金展<sup>1</sup>, 刘奥<sup>1</sup>, 武颖韬<sup>1</sup>, 李建玲<sup>2</sup>, 汤成龙<sup>1</sup>, 黄佐华<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 西北工业大学动力与能源学院, 710072, 西安)

**摘要:** 为明确离子液体改性燃料在静电场中的运动机制, 实现静电场对微尺度流场运动行为的高效调控, 采用粒子图像测速技术对针-板电极结构附近介电燃料液体中产生的电流体动力学效应进行表征, 研究了不同电场施加条件及离子液体改性对流体运动特性的影响。研究表明, 高压静电场作用下, 外加电压幅值及电极间隙可显著影响介电液体流动特性, 流场扰动速度随电压和间隙的增加而增大。通过添加离子液体对燃料液体进行改性, 发现混合溶液黏度随离子液体的体积分数增加呈非线性增长特征, 电导率呈现先上升后下降的非单调变化趋势。与传统添加高电导率液体增强电流体动力学效应不同, 离子液体的引入会在电极附近形成由阴、阳离子定向运动产生的反向屏蔽电场, 形成局部电场屏蔽作用, 抑制溶液的电流体运动特性, 添加体积分数为 1% 的离子液体后, 在电场作用下, 溶液流速降低 91.9%。该研究揭示了离子液体改性对燃料电流体动力学行为的调控机制, 为发展新型电控燃料喷射或微流体驱动技术提供了理论依据与实验支撑。

**关键词:** 电流体动力学; 针-板电极结构; 介电液体; 离子液体改性; 电场屏蔽; 粒子图像测速技术

**中图分类号:** TK401 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202607007 **文章编号:** 0253-987X(2026)07-0069-08

## Research on the Electrohydrodynamic Effects of Ionic Liquid-Modified Fuels

QI Hanxuan<sup>1</sup>, LI Jinzhan<sup>1</sup>, LIU Ao<sup>1</sup>, WU Yingtao<sup>1</sup>, LI Jianling<sup>2</sup>,

TANG Chenglong<sup>1</sup>, HUANG Zuohua<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To clarify the motion mechanism of ionic liquid-modified fuels in electrostatic fields and to efficiently regulate the fluid motion behavior of the micro-scale flow field under electrostatic fields, the electrohydrodynamic (EHD) effects generated in dielectric fuel liquids near a needle-plate electrode structure were characterized using particle image velocimetry (PIV). The effects of varying electric field conditions and ionic liquid modification on fluid motion characteristics were systematically investigated. The results show that under high-voltage electrostatic fields, the flow characteristics of the dielectric fluid are significantly influenced by the applied voltage magnitude and electrode gap. Furthermore, the flow disturbance velocity rises as the voltage and electrode gap increase. Through the modification of fuel liquids with ionic liquids, it was observed that the viscosity of the blended solution increases nonlinearly with the volume fraction

收稿日期: 2025-10-17。 作者简介: 戚晗轩(2001—), 男, 硕士生; 武颖韬(通信作者), 男, 副教授, 硕士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2241255, 52236001)。

网络出版时间: 2026-01-14

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260113.1742.005>

of the ionic liquid, while the electrical conductivity varies non-monotonically with ionic liquid fraction, first increasing and then decreasing. Contrary to the conventional enhancement of EHD effects via highly conductive additives, the addition of ionic liquids was found to generate a reverse shielding electric field near the electrodes due to the directed migration of anions and cations. This results in a local electric field shielding effect that suppresses the EHD motion characteristics of the solution. Specifically, with the addition of 1.0% volume of ionic liquid, the flow velocity of the solution under the electric field was reduced by 91.9%. This research elucidates the regulatory mechanism of ionic liquid modification on the EHD behavior of fuels, providing a theoretical basis and experimental support for the development of novel electronically-controlled fuel injection and microfluidic drive technologies.

**Keywords:** electrohydrodynamics; needle-plate electrode structure; dielectric fluids; ionic liquid modification; electric field shielding; particle image velocimetry

电流体动力学(EHD)作为流体力学与电磁学交叉领域中一项极具研究价值的分支,其核心在于利用电场力调控流体运动,从而实现对流体和微量物质的精确控制<sup>[1-2]</sup>。这种技术在微流控系统、生物医学以及材料科学等领域展现出重要的应用前景,并已在流体泵送<sup>[3-4]</sup>、喷射印刷<sup>[5-6]</sup>、传热传质<sup>[7-8]</sup>、气流控制<sup>[9-10]</sup>、电纺丝及电喷雾等多个领域得到广泛应用<sup>[11-12]</sup>。

已有研究结果表明,基于EHD的静电喷雾具有卓越的雾化调控能力<sup>[13-14]</sup>。然而,在航空发动机领域中,燃料通常采用煤油等绝缘电介质,其荷电能力较低,显著限制了电流的传导。在电喷雾技术中,介质的荷电能力是一个关键参数。高荷电能力意味着该介质可携带更多的自由电荷,在电场作用下大量自由电荷发生位移并实现动量交换,进而使液体燃油内部产生更强扰动,从而实现高效雾化。介质的荷电能力不仅与分子离子特性、电导率和介电常数等电学性质密切相关,还与设备设计以及电场配置息息相关<sup>[15]</sup>。流体介质的荷电能力对电场力的大小及其分布具有显著影响,从而间接决定了EHD技术的效果。

在低电导率介质中掺入高电导率组分,可以提高混合介质的整体电导率,从而增强液滴的雾化质量。Shrimpton和Yule<sup>[16]</sup>对荷电液态碳氢燃料的雾化、燃烧及其控制进行了深入研究。为提升碳氢燃料的荷电能力,他们在绝缘燃料中添加了抗静电剂,使燃料性质转变为半导体,显著改善了绝缘燃料的雾化质量,火焰得以保持稳定。Elegant等<sup>[17]</sup>通过对乙醇及乙醇-柴油混合物进行静电喷雾实验,发现混合燃料的电导率随乙醇含量呈指数增长。实验结果表明,添加体积分数为5%~15%的乙醇后,柴油喷雾液滴的均匀性显著改善,接近纯乙醇的效果。Jiang等<sup>[12]</sup>对

不同比例的生物柴油-乙醇混合燃料开展了锥-射流模式下的静电喷雾雾化及燃烧特性实验。结果显示,随着混合溶液中乙醇体积分数从0增加至40%,喷雾角明显增大,液滴破碎长度缩短,且雾滴粒径由128  $\mu\text{m}$ 减小至12  $\mu\text{m}$ 。Xu等<sup>[18]</sup>通过增加体积分数为8%的乙醇改善了六氟异丙基甲基醚(HFE-7100)介电液体的充电性能,从而提升了其电导率。

离子液体是一种具有高电导率的介质,由有机阳离子和有机或无机阴离子构成,其低温熔盐特性使得阴、阳离子成为高迁移能力的载流子,从而表现出较一般分子液体更优异的导电性能,其电导率比乙醇等传统绝缘燃料至少高出3个数量级<sup>[19]</sup>。离子液体添加在电推进领域展现出优异的性能。Guerrero等<sup>[20]</sup>采用碳酸丙烯酯作为溶剂,通过实验结合漏电介质模型框架下的数值模拟,研究了添加1-乙基-3-甲基咪唑啉双(三氟甲基磺酰基)亚胺(EMI-TFSI)或1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐(EMI-BF<sub>4</sub>)的混合液体在泰勒锥中的离子蒸发现象。结果表明,添加体积分数为10%或15%的1-乙基-3-甲基咪唑啉咪唑盐(EMI-IM),可使混合液体在静电喷雾过程中趋近于纯离子状态,显著改善了电推进性能。

离子液体添加可以显著提高流体介质的电导率,但同时引入大量的正、负两种电荷的离子也将改变传统仅由自由电荷运动产生动量交换的EHD机制。离子液体添加对绝缘燃料介质在静电场中运动的影响规律还不明晰。燃油在喷孔内的流动直接决定喷雾出口的边界条件,开展离子液体添加对燃油电流体动力学特性影响的研究具有重要意义。

本研究主要聚焦于绝缘燃料及其与离子液体混合溶液中的EHD流现象。首先,利用粒子图像测速(PIV)系统对针-平面电极对中产生的EHD流动

进行可视化观察,同时结合电流测量,系统探讨施加电压与电极间隙对 EHD 流动的影响;此外,通过按比例掺混离子液体,进一步分析离子液体掺入对 EHD 流动特性的调控作用。本研究旨在阐明离子液体添加对燃料在静电场中运动的影响机制,为航空发动机中引入燃料改性-电场辅助雾化技术提供实验参考和理论依据。

## 1 实验方法

### 1.1 实验装置

本文所采用的 PIV 实验装置示意图如图 1 所示,可用于捕捉静置液体在电场作用下的流动特性。激光片光用于照射实验容器内的电极轴,而相机则垂直于激光片光布置,以避免产生明显的光反射。电极系统由不锈钢针和不锈钢板构成,形成针-板电极结构。实验容器为  $48\text{ mm} \times 48\text{ mm} \times 48\text{ mm}$  的立方体,其四壁采用透光性能良好的石英玻璃,而顶板则采用绝缘性能优越的亚克力材料。针状电极尖端与板电极之间的距离为电极间隙,通过分辨率为  $0.001\text{ mm}$  的弹簧千分尺进行设定,可实现不同间隙的调控。在实验中,高压电源向针状电极提供  $0 \sim 20\text{ kV}$  的可调正电压,而板电极固定接地。电极尖端可近似视为双曲面,其尖锐程度通过尖端半径衡量。经过精细打磨,电极尖端半径约为  $100\text{ }\mu\text{m}$ 。测试时环境温度维持在  $22\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度控制在  $50\% \sim 60\%$  之间<sup>[21-22]</sup>。工作液选用无水乙醇及无水乙醇与离子液体混合溶液,所用离子液体为 1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐(Bmim BF<sub>4</sub>),其电导率较高( $3.6\text{ S/m}$ )且极性较低,与乙醇的互溶性更好。电

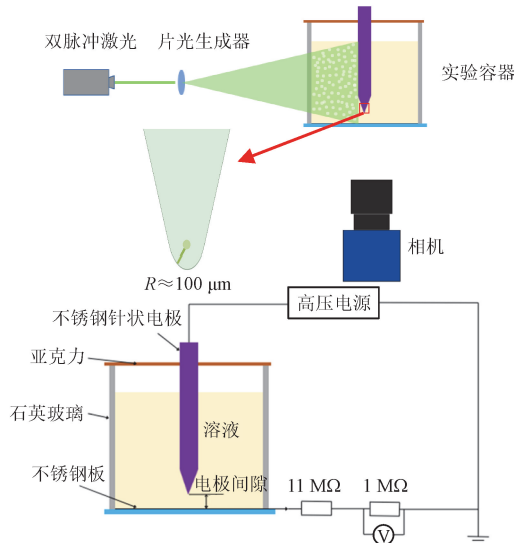


图 1 PIV 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the PIV experimental setup

流监测贯穿整个实验过程,通过测量低阻值分压电阻两端的电压,依据欧姆定律计算出电流值。为保护电压测量仪器免遭损坏,在负极板后串联了保护电阻。鉴于电压表量程不足以直接测量  $12\text{ kV}$  高压,采用了串联两个电阻(阻值分别为  $11\text{ M}\Omega$  和  $1\text{ M}\Omega$ ) 的方案。在实验过程中,通过测量  $1\text{ M}\Omega$  电阻两端的电压  $V_r$ ,并依据欧姆定律计算实际电势差。设高压电源输出电势为  $V_g$ ,则正负极之间的实际电势差可表示为  $V_a = V_g - 12V_r$ 。

### 1.2 速度测量

为了更加清晰地捕捉流动特性,本实验选用分辨率为  $2\,448 \times 2\,050$  像素的 LaVision SX 5m 相机,并利用双脉冲激光器产生激光片光照亮流动区域,各项实验操作均由 LaVision 的 DAVIS 10 软件进行控制。PIV 实验系统搭载尼康  $50\text{ mm}$  定焦镜头,成像分辨率满足实验要求,流场粒子成像清晰,可精准完成速度场测量。由于激光照射电极时会产生强烈的光反射,可能损伤相机,为降低噪声并保护相机,实验中配置了一块窄带滤波片,其透射波长范围为  $(532 \pm 10)\text{ nm}$ ,可见光透射率为  $10\%$ 。在实验过程中,曝光时间被限制在  $2\,000\text{ }\mu\text{s}$  内。将两帧图像中示踪粒子的位移限制在 15 像素之内<sup>[23]</sup>,以此标准确定两帧激光之间的时间间隔。考虑到速度场对电压具有依赖性,不同电压下必须采用不同的时间步长以维持粒子的运动限制。图像以  $5\text{ Hz}$  采集频率进行,每次实验共采集 1 500 对图像,其中,每对图像由拍摄时间间隔极短的两幅图像组成,由软件处理出拍摄时刻的瞬时速度场,最后对 1 500 对图像的瞬时速度场进行时间平均处理,足以获取较为准确的时间平均速度场。所用示踪粒子直径为  $10\text{ }\mu\text{m}$ ,分子式为  $\text{C}_{26}\text{H}_{50}\text{O}_4$ ,密度为  $941\text{ kg/m}^3$ 。为避免颗粒对流动特性与电流分布产生影响,将播种质量浓度设置为  $0.2\text{ g/L}$ <sup>[24]</sup>,既可避免颗粒浓度过饱和,又能防止浓度过低。

### 1.3 黏度及电导率测量

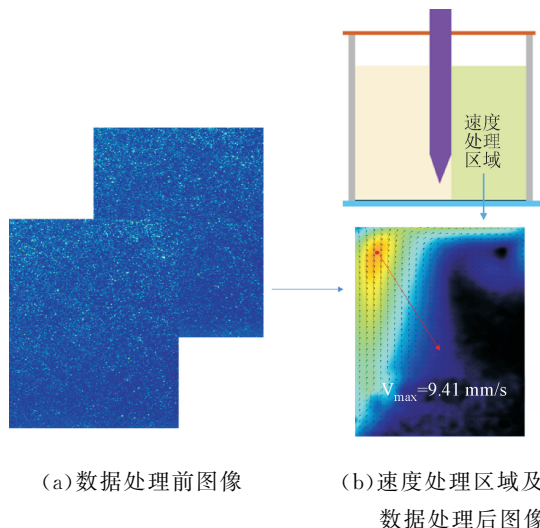
电导率测量采用联测在线电导率仪,耐腐蚀的聚砜电极内置温度传感器具备自动温度补偿功能,所有测定结果自动校正到  $298.15\text{ K}$  下的数据。调整仪器水平,正确连接端子后,将电极没入被测溶液,待稳定后读取电导率数值。

黏度测量采用上海力辰 NDJ-5S 型旋转黏度计,可以用来测量牛顿流体的绝对黏度和非牛顿流体的表观黏度。调整仪器水平,参照量程表选择合适的转子旋入转子连接头,电机经变速带动转子做

恒速旋转,当转子在液体中旋转时,液体产生作用在转子上的黏性力实时显示在仪器屏幕上,待稳定后读取黏度数值。

#### 1.4 图像处理

PIV 速度矢量场的计算主要采用 DAVIS 10 软件实现。在后处理过程中,通过对图像中粒子的识别,利用极短时间间隔内两帧图片中同一粒子位移与时间间隔的比值,近似估算出粒子的运动速度。采用多通道方法,从 48 像素 $\times$ 48 像素的正方形窗口出发,并设置 75% 的窗口重叠率,即从流场区域的角落开始,选取一个 48 像素 $\times$ 48 像素的窗口进行互相关计算,随后将这个窗口在水平和垂直方向上移动它自身尺寸的 25%,进行下一次计算,直至覆盖图片的所有区域即为处理完成。对于区域内可能存在的速度空白,使用所有非零邻域速度的平均值进行插值计算<sup>[23]</sup>。数据处理前后图像对比及速度处理区域如图 2 所示。对于文中的实验结果图及数值模拟结果图,本文实验所得图片的视角均为图 2 中展示的速度处理区域。实验分别在 9、12 kV 的高压条件下开展,在每一高压条件下又进行 3 组不同电极间隙的实验。需要特别指出,为了获得准确的速度矢量场,必须确保两束激光作用下的粒子相关性达到足够高的标准,即在静止状态下,两帧图像中示踪粒子数的差异应低于 10%,且同一示踪粒子在 2 帧中的位置偏差不得超过 1 像素<sup>[23]</sup>。



(a) 数据处理前图像

(b) 速度处理区域及  
数据处理后图像

图 2 数据处理前后图像对比及速度处理区域

Fig. 2 Comparison of images before and after data processing and the speed processing area

#### 1.5 数值模拟方法

对于针-板电极对产生的非均匀高压电场而言,实验条件下难以准确测定流场中电荷密度与电场强

度的分布,因此,本文采用数值计算方法对液体所受电场力进行分析。求解空间电场强度的方程组<sup>[25]</sup>可表述为

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (3)$$

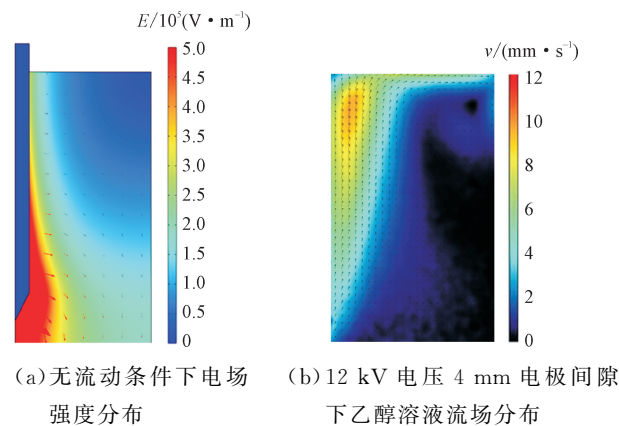
$$\rho = \sum_i z_i e n_i \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{E}$  为电场强度;  $\rho$  为空间电荷密度;  $\epsilon$  为相对介电常数;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $\varphi$  为电势;  $\mathbf{D}$  为电位移;  $z_i$  为第  $i$  种离子电荷数;  $e$  为基本电荷;  $n_i$  为第  $i$  种离子浓度。建立二维轴对称模型后,进行网格划分。模型底部为负电极,作接地处理,侧面为零电势,向正电极施加一个初始电势后,进行数值计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电压/电极间隙对于流动的影响

电场强度及流场分布如图 3 所示,  $v$  为溶液流速,溶液中电场强度呈现沿正电极向负电极降低的趋势,正电极附近电场强度最大。静电场中的电极附近乙醇溶液总体呈现沿正电极由下而上运动,受到液面顶端及电极边界影响,在液面下端 6 mm 处液体流速达到最大值,随之产生径向流动。



(a) 无流动条件下电场  
强度分布

(b) 12 kV 电压 4 mm 电极间隙  
下乙醇溶液流场分布

图 3 电场强度分布及流场分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the distribution of electric field intensity and flow field

不同电压下乙醇溶液速度场分布如图 4 所示,当外加电势增大时,产生明显运动的流体区域呈现朝电极方向收拢的趋势,且峰值流速显著提高。例如,在电极间隙为 3 mm 的情况下,峰值流速由电压为 9 kV 时的 5.86 mm/s 增加至 12 kV 时的 8.52 mm/s,增幅达到 45.4%。当电极间隙分别为 1.8 和 4.0 mm 时,峰值流速的提升率分别为 29.2% 和 14.8%。这一现象可归因于在电场力的

作用下流体产生流动,而电场力与外加电势呈正相关,从而导致峰值流速随外加电势的增加而上升。

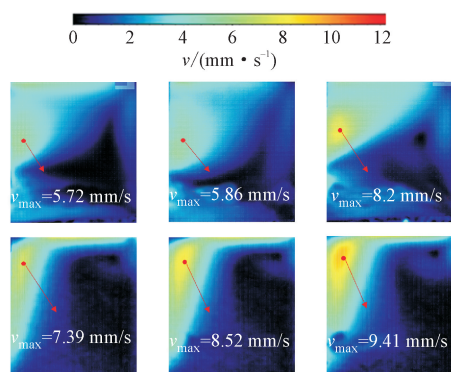


图4 不同最大电压下乙醇溶液速度场分布  
Fig.4 Velocity field distribution of ethanol solution under different voltages

图5展示了电压为12 kV时不同电极间隙下的速度场图像。由图可见,随着电极间隙的增大,峰值流速呈上升趋势并形成明显的速度核心。由于针电极尖端与负极不锈钢板产生的电场强度在电极附近的局部区域较高(如图3),对流体流动具有极其显著的影响。在流场远端,电场力对于流动的调控作用几乎可以忽略不计,流动主要受惯性和黏性作用影响。随着电极间隙的增大,流体动量交换最为剧烈的区域整体上移。在这一过程中,流体的上升距离相对缩短,从而减小了动量损失,最终形成明显的速度核心。需要指出的是,数值模拟仅呈现了电场强度的结果,并未考虑与流场之间的耦合效应;而实验过程中,由于电场与流场相互耦合,流体分子之间的动量交换以及黏性效应均必须加以考虑。

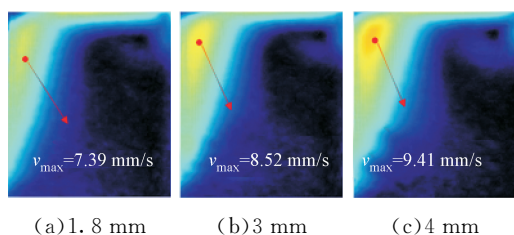


图5 电压12 kV时不同电极间隙下乙醇溶液速度场分布  
Fig.5 Velocity field distribution of ethanol solution under different electrode gaps at a voltage of 12 kV

不同电压、电极间隙下的峰值流速如图6所示,可观察到电压及电极间隙均与峰值流速呈正相关,但不呈现线性关系。不同电压、电极间隙下测量电流值如图7所示,可观察到电流与电压呈正相关,与电极间隙呈负相关。

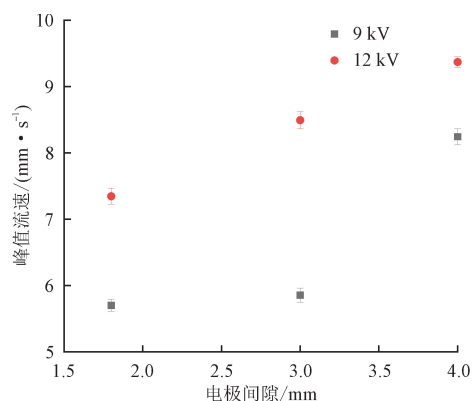


图6 不同电压、电极间隙下的流场峰值流速  
Fig.6 Peak flow velocity of the flow field under different voltages and electrode gap

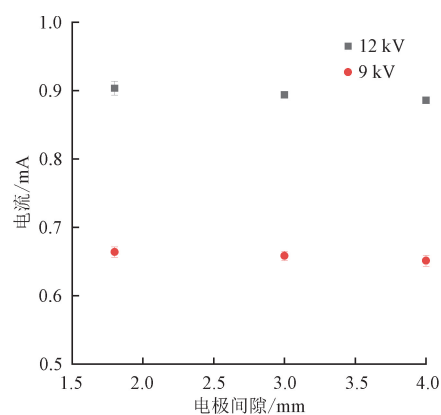


图7 不同电压、电极间隙下的电流  
Fig.7 Current under different voltages and electrode gap

## 2.2 离子液体添加对混合溶液黏度及电导率的影响

乙醇与 Bmim BF<sub>4</sub> 混合溶液的黏度如图8所示,可见混合溶液的黏度变化呈现非线性特征,这与文献[26]中的测量结果是一致的。

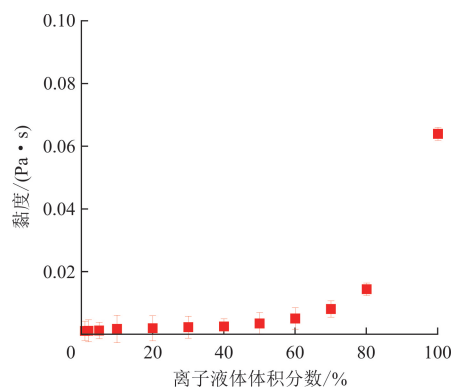


图8 不同离子液体体积分数下混合溶液的黏度  
Fig.8 Electrical conductivity of the mixed solution under different concentrations of ionic liquid

乙醇与 Bmim BF<sub>4</sub> 混合溶液的电导率如图 9 所示,可见溶液的电导率随着离子液体体积分数的增大先呈上升趋势,在达到某一浓度时达到峰值,随后逐步降低。这主要归因于乙醇虽然具有较高的介电常数,但其本身电导率相对较低。当离子液体体积分数较低时,溶液黏度较低且上升较缓,同时离子液体的电离度较高,从而使电导率随体积分数的增加而上升;而当离子液体体积分数较高时,溶液黏度显著增大,导致离子液体的电离程度降低及离子迁移速率减慢,进而使电导率逐渐下降<sup>[27]</sup>。

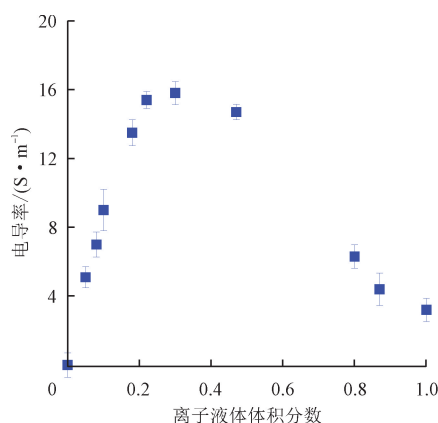
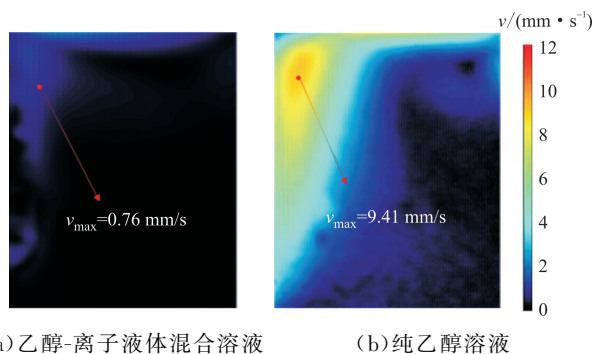


图 9 不同离子液体体积分数下混合溶液的电导率  
Fig. 9 Electrical conductivity of the mixed solution under different concentrations of ionic liquid

### 2.3 离子液体添加对混合溶液电流效应的影响

添加体积分数为 1% 的离子液体显著提升了混合溶液的电导率,而对黏度的影响较小,预期可进一步增强混合溶液的电流效应。然而,在相同的电源电压下添加体积分数为 1% 的离子液体的混合溶液流速受到了极大的抑制,混合溶液与纯乙醇溶液速度场对比如图 10 所示。当电极间隙为 4 mm、电压为 12 kV 时,纯乙醇溶液峰值流速达到 9.41 mm/s,而电导率更高的混合溶液峰值流速仅仅只有 0.76 mm/s。



(a) 乙醇-离子液体混合溶液 (b) 纯乙醇溶液  
图 10 混合溶液与纯乙醇溶液速度场对比矢量图

Fig. 10 Vector diagram of the velocity field of the mixed solution and pure ethanol solution

为了更好地阐释实验过程中观察到的现象,并明确液体在静电场中运动的基本机理,本研究对正、负极之间的实际电压进行了测量。通过对比乙醇溶液与乙醇-离子液体混合溶液中的实际电压数据,如表 1 所示,添加少量离子液体的溶液正、负极之间的电势差减小为 60 V,可初步断定高电导率混合溶液中的电场受到屏蔽,即溶液中产生的实际电势差降低,难以有效驱动流体运动。

表 1 不同溶液实际电压测量结果

Table 1 Measurement results of actual voltages for different solutions

| 溶液          | 高压电源<br>施加电压/kV | 小电阻<br>电压/V | 正负极<br>电压/V |
|-------------|-----------------|-------------|-------------|
| 乙醇          | 12              | 883         | 1 404       |
| 乙醇-离子液体混合溶液 | 12              | 995         | 60          |

### 2.4 离子液体添加对电场下液体运动的影响机制

与燃油中添加乙醇提高电导率的方式相比,添加离子液体引入大量的阴、阳离子,如图 11 所示,向电极施加高压电势后,溶液中的阴离子迅速向正极端聚拢,而阳离子向负极端聚拢,形成阴、阳离子层,离子层间产生反向电场,导致溶液所受电场力减小,削弱正向电场对于流场的调控作用。

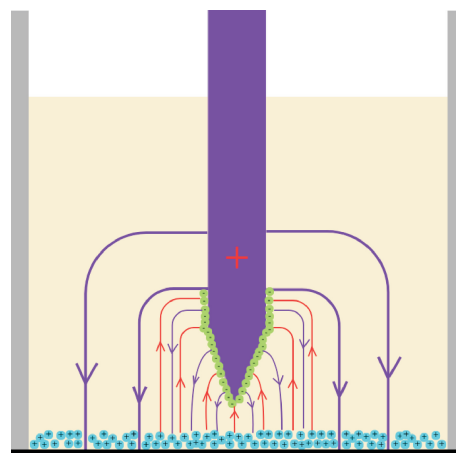


图 11 电场屏蔽效果图

Fig. 11 Electric field shielding effect drawing

在文献[20]及其他电场辅助流体雾化的研究中,实验发生在真空和泰勒锥-射流结构中,注入的电荷或离子被迅速地从液面迁移,电荷难以长时间积聚以形成完整的屏蔽层。本文研究场景为封闭系统内的静止流体,液体没有净流出,电荷在系统内迁移积聚,形成反向电场,抑制电流效应。

介电液体在电场中受到的电场力主要由库仑

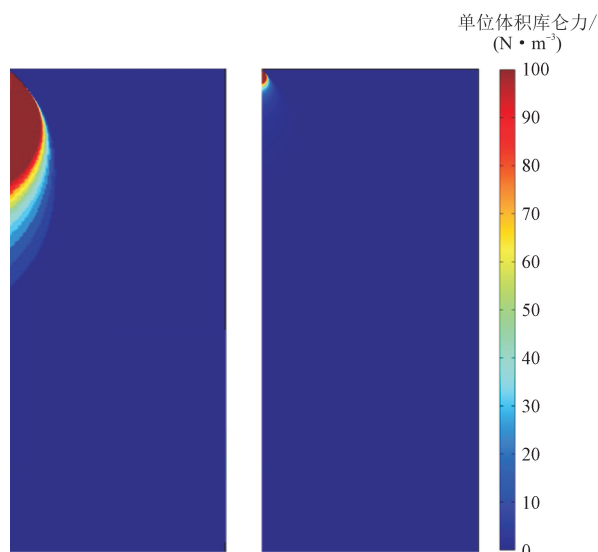
力、介电泳力、电致伸缩力组成<sup>[28]</sup>,可以表示为

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} - \frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon_r\nabla|\mathbf{E}|^2 = \nabla\left[\rho\frac{E^2}{2}\left(\frac{\partial\epsilon}{\partial\rho}\right)\right] \quad (5)$$

式中:  $q$ 、 $\epsilon_r$  分别为空间电荷密度、相对介电常数。电致伸缩力可理解成某一标量的梯度,因此可并入动量方程中的压力梯度项,不会对流体运动产生影响<sup>[28]</sup>。

对电场力公式各项的分析结果表明,在加入一定体积的离子液体后,溶液中的自由离子浓度提高,高电导率的特性使得自由离子更易分离和迁移,导致溶液中的电荷密度增大。阴、阳离子层产生的反向电场极大削弱了正向电场强度。计算得出,由于电场强度下降的幅度超过电荷密度增加所带来的影响,导致库仑力降低,计算结果中,单位体积库仑力由  $10^5 \text{ N/m}^3$  降低为  $10^4 \text{ N/m}^3$ 。同时,电场强度及相对介电常数的降低也使得介电泳力的幅值减弱,削弱了溶液的电流体效应。

通过对实验场景进行数值模拟,可发现乙醇溶液中液体受到的电场力远大于乙醇-离子液体混合溶液,乙醇溶液与乙醇-离子液体混合溶液电场力如图 12 所示;进一步提取整个流场中的电场力最大值时,两者之间的差异超过 11 倍。



(a)乙醇溶液电场力 (b)乙醇-离子液体混合溶液电场力

图 12 乙醇溶液与乙醇-离子液体混合溶液电场力

Fig. 12 Electric field force of ethanol solution and ethanol-ionic liquid mixed solution

以上研究结果表明,通过添加离子液体提高溶液介质的电导率无法增强溶液的 EHD 效应,反而会在电极附近形成由阴、阳离子定向运动导致的反向电场,形成电场屏蔽作用,减弱溶液的 EHD 效

应。因此在实际 EHD 系统设计中,应协同考虑介电常数、离子迁移特性与电荷极性等多参数耦合作用,通过分析有效场强与界面电荷行为,指导电场对于流场的调控作用。

### 3 结 论

本文通过实验与数值模拟的方法,深入研究离子液体改性燃料的电流体动力学效应,得到以下结论。

(1)电压、电极间隙与溶液峰值流速呈正相关。当外加电势增大时,峰值流速显著提高且产生明显运动的流体区域呈现朝电极方向收拢的趋势;随着电极间隙的增大,峰值流速呈上升趋势并形成明显的速度核心。

(2)随离子液体添加量增加,混合溶液的黏度变化呈现非线性增长特征,混合溶液电导率呈现先上升后下降的非单调变化趋势。添加少量离子液体显著提升溶液电导率而黏度变化不大。

(3)离子液体的添加,使溶液中引入了大量阴、阳离子,阴、阳离子层产生反向电场,出现“电场屏蔽”现象,显著削弱电场对于流场的调控作用。在实际 EHD 系统设计中,应协同考虑介电常数、离子迁移特性与电荷极性等多参数耦合作用,通过分析有效场强与界面电荷行为,指导电场对于流场的调控作用。

### 参考文献:

- [1] Onses M S, Sutanto E, Ferreira P M, et al. Mechanisms, capabilities, and applications of high-resolution electrohydrodynamic jet printing [J]. *Small*, 2015, 11(34): 4237-4266.
- [2] Abdul Halim B, Dehghanghadikolaei A, Amili O, et al. Understanding electrohydrodynamic (EHD) performance of corona discharge via particle image velocimetry (PIV) [J]. *SN Applied Sciences*, 2022, 5(1): 33.
- [3] Peng Yanhong, Li Dongze, Yang Xiaoyan, et al. A review on electrohydrodynamic (EHD) pump [J]. *Micromachines*, 2023, 14(2): 321.
- [4] Wang Pohao, Wen T Y. Effects of inlet blockage and electrical driving mode on static pressure and flow rate of wire-rod electrohydrodynamic pumps [J]. *Journal of Electrostatics*, 2020, 103: 103409.
- [5] Cui Yan, Yu Hao, Abbas Z, et al. PZT composite film preparation and characterization using a method of sol-gel and electrohydrodynamic jet printing [J]. *Micromachines*, 2023, 14(5): 918.
- [6] Han Yiwei, Dong Jingyan. Electrohydrodynamic (EHD) printing of molten metal ink for flexible and stretchable

- conductor with self-healing capability [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(3): 1700268.
- [7] Seyed-Yagoobi J. Augmentation of two-phase and single-phase heat transfer and mass transport with electrohydrodynamics in thermal equipment [C]//Proceedings of 1999 IEEE 13th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 378-383.
- [8] Paul N, Suresh L, Seo J, et al. Electrohydrodynamically printed solid-state Photo-electro protein micro-capacitors [J]. *Energy Storage Materials*, 2023, 61: 102839.
- [9] 许光可, 房新振, 刘勇, 等. 用于电流体动力气流控制的等离子体发生器 [J]. *高压电器*, 2011, 47(1): 95-99.
- Xu Guangke, Fang Xinzheng, Liu Yong, et al. Plasma actuator used for electrohydrodynamic (EHD) flow control [J]. *High Voltage Apparatus*, 2011, 47(1): 95-99.
- [10] Pham T T, Tu H P, Dao T D, et al. Fabrication of an anode functional layer for an electrolyte-supported solid oxide fuel cell using electrohydrodynamic jet printing [J]. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, 10(1): 015004.
- [11] Chen Xiaopeng, Cheng Jiusheng, Yin Xiezheng. Advances and applications of electrohydrodynamics [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(11): 1055-1063.
- [12] Jiang Zhengwei, Gan Yunhua, Juu Yiguang, et al. Experimental study on the electrospray and combustion characteristics of biodiesel-ethanol blends in a meso-scale combustor [J]. *Energy*, 2019, 179: 843-849.
- [13] Wang Z, Tian Y, Zhang C, et al. Massively multiplexed electrohydrodynamic tip streaming from a thin disc [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(6): 064502.
- [14] Duby M H, Deng Weiwei, Kim K, et al. Stabilization of monodisperse electrosprays in the multi-jet mode via electric field enhancement [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2006, 37(3): 306-322.
- [15] Zhu Yong, Gao Mengxiang, Chen Mingxia, et al. Numerical simulation of capture process of fine particles in electrostatic precipitators under consideration of electrohydrodynamics flow [J]. *Powder Technology*, 2019, 354: 653-675.
- [16] Shrimpton J S, Yule A J. Atomization, combustion, and control of charged hydrocarbon sprays [J]. *Atomization and Sprays*, 2001, 11(4): 365-396.
- [17] Elegant D S, Kang T, Kyritsis D C. Experimental investigation of electrostatic effects on ethanol and ethanol-diesel blend sprays in atmospheric ambiance [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2009, 50: 1-4.
- [18] Xu Haojie, Wang Junfeng, Tian Jiameng, et al. Electrohydrodynamic disintegration of dielectric fluid blended with ethanol [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(6): 062107.
- [19] 邓友全. 离子液体: 性质、制备与应用 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [20] Guerrero I, Bocanegra R, Higuera F J, et al. Ion evaporation from Taylor cones of propylene carbonate mixed with ionic liquids [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 591: 437-459.
- [21] Lee J W, Heo H, Sohn D K, et al. Control of electrohydrodynamic (EHD) flow by secondary electric potential [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 186: 122490.
- [22] Perri A E, Sankaran A, Kashir B, et al. Electrically driven toroidal Moffatt vortices: experimental observations [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 900: A12.
- [23] Wilson B M, Smith B L. Uncertainty on PIV mean and fluctuating velocity due to bias and random errors [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(3): 035302.
- [24] Daaboul M, Louste C, Romat H. PIV measurements of the influence of seeding particles concentration on the velocity of an EHD flow [C]//ESA/IEEE-IAS/IEJ/SFE Joint Conference on Electrostatic. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [25] Chirkov V A, Stishkov Y K. Current-time characteristic of the transient regime of electrohydrodynamic flow formation [J]. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71(3): 484-488.
- [26] Kendall J, Monroe K P. The viscosity of liquids: II the viscosity-composition curve for ideal liquid mixtures [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1917, 39(9): 1787-1802.
- [27] 王方惠, 李春喜, 孟洪, 等. 离子液体在水、乙醇及其混合物中的电导率测定 [J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(6): 17-21.
- Wang Fanghui, Li Chunxi, Meng Hong, et al. Determination of conductivity of ionic liquids in water or ethanol and their mixtures [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 33(6): 17-21.
- [28] Debye P, Hückel E. The theory of electrolytes: I Freezing point depression and related phenomenon [J]. *Physikalische Zeitschrift*, 1923, 24: 185-206.

(编辑 武红江)