电流体动力学传导泵研究进展

杜中林, 吴健*, 黄俊宇, 王琦

哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 空天热物理工信部重点实验室, 哈尔滨 150001

* E-mail: jian.wu@hit.edu.cn

收稿日期: 2021-07-17; 接受日期: 2021-10-14; 网络版发表日期: 2022-02-07

国家自然科学基金(批准号: 12172110)和北京卫星环境工程研究所(CAST-BISEE)创新基金(编号: 2019-012)资助项目

摘要 本文介绍了一种新兴的流体流动生成与控制技术——电流体动力学传导泵(电导泵)。该种泵是基于电场与介电液体直接相互作用的一类非机械泵。库仑力为泵驱动力, 自由电荷来源于液体中杂质或弱电解质的解离过程。除了拥有电流体泵的普遍优点(如可通过电场实现智能主动控制、无机械运动部件、设计简单、重量轻、适用于低重力空间等特殊环境、能耗低等), 电导泵还具有性能稳定、工作寿命长等独特优势。除了流量调控、传热强化和增强混合等传统应用, 近年来电导泵在微型机器人驱动、可穿戴设备、机电一体化(制动器)等领域获得多种创新应用。目前, 国外电导泵技术已从宏观尺度单相流体逐步发展到微尺度多相流研究, 并开始在低重力环境在轨进行测试, 有望应用于未来航天器空间热管理等领域。国内对电流体动力学的研究起步较晚, 缺少电导泵相关的研究。因此, 本文从电导泵工作原理、理论模型、数理方程、研究现状和前沿进展等方面进行了总结, 并对未来发展进行了展望。

关键词 电流体动力学, 电导泵, 介电液体, 库仑力, 散热系统

1 引言

泵是输送流体或使流体增压的机械, 是流体驱动控制的引擎和动力源。基于不同的原理和策略, 人们提出了各种各样的泵^[1,2]。按照泵内有无运动部件, 可分为机械泵(如离心泵、活塞式泵、压电泵、形状记忆合金泵等)和非机械泵(如磁流体泵、电流体泵、电渗泵、电润湿泵、超声驱动泵等)^[3~5]。这些泵有不同的工作原理、外部能量源、适用的流体工质、压力产生能力、泵效率, 适用于不同的领域。

电流体泵(electrohydrodynamic pump)是基于电场与流体直接相互作用的一类非机械泵。它是利用介电

流体(dielectric fluids, 如空气、变压器油、酒精、各种制冷剂)能承受高强电场并在电场力作用下产生连续流动的特性, 实现电能和流体动能的直接相互转换^[6,7]。这类泵的优点包括: (1) 可通过改变电场实现快速、智能主动控制; (2) 无机械运动部件、设计简单、重量轻; (3) 适用于低重力空间等特殊环境; (4) 适用于单相和多相流; (5) 流体电流小, 能耗低; (6) 无振动、低噪音等^[8,9]。近年来, 随着介电液体电流体动力学理论的发展, 不同空间尺度电导泵及耦合相变过程的数理模型也日趋成熟。随着微加工技术和材料科学的发展, 微尺度电导泵已经成为当前非机械泵的研究热点之一。另外, 先进数值模拟方法和流场可视化实验技

引用格式: 杜中林, 吴健, 黄俊宇, 等. 电流体动力学传导泵研究进展. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1623–1648

Du Z L, Wu J, Huang J Y, et al. Overview of electrohydrodynamic conduction pumping (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1623–1648, doi: 10.1360/SST-2021-0298

术也开始广泛应用于电导泵的机理研究和优化设计. 本文将对这些方面的重要进展进行总结.

电场作用于液体中自由电荷产生的库仑体积力是电流体泵的主要驱动力. 电子总是会很快地被液体分子俘获, 因此液体中自由电荷一般分为正、负离子. 根据介电液体中离子产生机制的不同, 存在三种电流体泵: 注入或拖曳泵^[10,11](injection/ion-drag pump)、感应泵^[12,13](induction pump)和传导泵^[14,15](conduction pump). 电渗泵(electroosmotic pump)也是一种库仑力驱动泵^[16,17]. 与电流体泵中库仑力作用于液体内部的离子不同, 电渗泵中库仑力作用于固-液界面双电层内的离子. 通常电渗泵的特征尺寸小, 泵送的液体电导率高, 电场方向一般沿着管道边界. 另外, 还存在其他类型的电流体泵, 如第二类电渗泵^[18]、由离子浓度差驱动的泵^[19]、由昂萨格-维恩(Onsager-Wien)效应驱动的泵^[20]等.

电流体注入泵中, 电极-液体界面的电化学反应形成同号电荷层(homocharge layer), 自由电荷在电场作用下进入液体内部并沿电场线迁移, 拖曳周围的流体产生流动. 此种泵研究的最早、最充分, 但电荷注入可能会改变流体的化学组成和电极表面性质, 从而影响泵性能的稳定性和寿命. 例如, 于翮等人^[21]研

制的微型注入泵运行了20 min后即发生性能衰减并失效. 感应泵中, 自由电荷来源于电导率空间不均匀性, 行波交流电场对电荷的吸引和排斥作用引起流体流动. 感应泵的工质一般为非等温流体(电导率随温度变化)或气-液两相流(电导率在相分界处有阶跃), 不适用于单相等温液体^[6].

电导泵中的自由电荷来源于杂质或弱电解质的解离过程. 在无外加电场或弱电场(小于 10^6 V/m, 避免电场影响解离过程)作用下, 介电液体整体呈电中性, 其低电导率源自电中性分子AB通过可逆的解离-结合过程(dissociation-recombination)形成的离子 A^+ 和 B^- :

其中, k_d 与 k_r 分别为解离和结合速率. 当施加较强的电场时, 以上平衡不再保持: 一方面, 解离速率会随着电场增强而增加, 从而产生更多的自由电荷, 即昂萨格-维恩效应^[22]; 另一方面, 电场排斥与电极极性相同的离子, 形成异号电荷层(heterocharge layer), 如图1(a)和(b)所示. 当作用于异号电荷层的库仑力不能相互平衡时, 流体将产生流动. 为了获得更强的净库仑力, 电导泵通常采用非对称电极布置. 图1为两种典型的非对称

图1 (网络版彩图)两种典型非对称电极布置示意图和实物图. (a), (c) 多孔-圆环电极^[23]. Copyright©2004, Elsevier; (b), (d) 尺寸不同的平嵌电极^[24]. Copyright©2011, Elsevier

Figure 1 (Color online) Schematic and physical diagrams of two typical asymmetric electrode arrangement. (a), (c) Perforated disk electrodes^[23]. Copyright©2004, Elsevier; (b), (d) flushed electrodes of different sizes^[24]. Copyright©2011, Elsevier.

电极结构布置的示意图和实物图: 多孔-圆环电极对和尺寸不同的平嵌电极对^[23,24].

电导泵适用的介电液体电导率范围较宽($10^{-11} \sim 10^{-7}$ S/m), 施加电场范围约在1~100 kV/cm(与流体性质和电极材料相关), 泵性能稳定、寿命长, 模块化特性突出. 泵产生流速和压强虽不高, 但可通过多泵串联和并联实现增压或增速^[25]. 例如, 文献^[26]对微尺度电导泵用于气-液两相流传热的长期可靠性进行了评估, 发现105 h内泵性能没有明显降低. 在2015年版《NASA技术路线图》中, 电导泵作为微通道液冷或相变冷却驱动泵之一, 将探索用于下一代航天器高功率电子元器件热管理. 在美国国家航空航天局(NASA)的连续资助下, 现任美国伍斯特理工学院(WPI)机械工程系主任的Seyed-Yagoobi教授主导了一系列电导泵的研究. 他们研制的第一代电导泵于2017年2月开始在国际空间站上上进行在轨测试, 持续到2018年8月, 验证了电导泵原理的有效性和长时工作稳定性. 第二代电导泵原计划于2021年在空间站进行测试^[27]. 除了传统的流量调控、强化传热和混合增强, 近年来电导泵在微型机器人驱动、可穿戴设备、机电一体化(制动器)、低重力空间智能液体储罐等领域获得创新应用^[28-33]. 其中, 最具代表性的成果是2019年发表于*Nature*上的小型可伸缩泵, 将弹性体加工技术与电流体泵完美结合^[33].

电导泵已展示广泛的应用前景, 但仍存在一些关键机理问题还未解决, 数值和实验研究方法还不完善, 一系列实验现象还未能解释清楚, 这些都制约了泵的发展和运用. 此外, 国内对电流体动力学研究起步较晚, 直到2020年第十一届全国流体力学学术会议才有专门的电磁流体力学专题会场. 陈效鹏等人^[34]对国内电流体动力学早期的研究进展进行了综述分析. 国内学者在电流体动力学领域成果集中在电喷雾、低温等离子体流动控制、电射流、电对流、静电除尘、电场强化换热、强化干燥实验研究等方面^[35-40]. 与磁流体泵相比, 国内学者对电流体泵的关注较少, 研究还未形成体系. 因此, 本文将结合电导泵的工作原理与理论模型、数学方程、电导泵的研究现状及前沿进展、未来展望进行总结.

2 电导泵的工作原理与理论模型

2.1 工作原理

介电液体中电荷输运的分解-结合机制虽然早已

为人所知, 但该机制应用于泵送液体是由Atten和Seyed-Yagoobi^[41,42]在1999年第十三届国际介电液体大会(ICDL)上首次提出, 正式论文发表于2003年^[24]. 他们建立了电导泵的初始理论模型, 推导了无量纲电导数 C_0 , 确定了电导泵两个典型工作区间: 欧姆区($C_0 < 1$)和饱和区($C_0 > 1$). 他们的模型只考虑了静压产生, 即流体不流动时泵产生的最大压力, 理论推导了两个工作区间的静压产生能力的表达式, 并将实验结果与理论预测进行了对比.

图1(a)和(b)为电导泵的工作原理. 电场作用于电极对附近的异号电荷层的库仑力不能完全相互平衡, 净库仑力驱动流体流动. 图2给出典型介电液体电流-电压特性曲线(I - U)示意图, 它包含三个分区, 即低压欧姆区、准欧姆区和指数区. 该曲线的准确理解是电流体动力学的核心任务之一, 依赖于两个紧密关联的基本问题的深刻认识: (1) 自由电荷的来源机制; (2) 流动对于电荷输运的贡献. 电荷注入和传导两种机制都与电场强度、电解质种类、电导率、电极材料及结构布置等因素有密切且复杂的关系. 尤其是, 分解速率和电荷注入强度都是电场的强相关函数. 近年来, 随着电荷注入和电传导模型、昂萨格-维恩效应、电流动转接和分叉理论等方面的发展, 电导泵的数学物理模型逐渐成熟. 电导泵中, 净电荷密度产生依靠介电液体中电解质的解离-结合机制, 对应于图2中低压欧姆区和准欧姆区. 注入或拖曳泵对应于指数区. 无外加

图2 (网络版彩图)典型介电液体电流-电压特性曲线. (I) 低压欧姆区, (II) 准欧姆区; (III) 指数区

Figure 2 (Color online) Typical current-voltage characteristics of dielectric liquids. (I) Ohmic region; (II) quasi-Ohmic region (saturation); (III) exponential growing region.

电场或低电场强度下, 分子解离结合机制处于动态平衡状态, 液体整体呈现电中性。在近壁面处, 存在着固-液界面双电层。双电层具有两层结构: 斯特恩层(the Stern layer)与德拜层(the Debye layer)。斯特恩层为近壁面紧密电荷层, 吸附在固体表面。德拜层又称扩散层, 层中离子保持可自由移动状态。德拜层厚度 λ_D 由电荷扩散和结合的平衡决定。电荷的特征扩散时间为 $\tau_D = \lambda_D^2 / D$, 特征结合时间为 $\tau_\sigma = \varepsilon / \sigma$, 其中 D , ε , σ 分别为扩散系数、介电常数和电导率。平衡状态下, $\tau_D \approx \tau_\sigma$ 。因此可得出平衡状态下德拜层厚度:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon D}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\varepsilon K k_B T}{\sigma e_0}}, \quad (2)$$

式中采用了爱因斯坦关系式(Einstein relation) $D = K k_B T / e_0$, K , k_B , T 与 e_0 分别为离子迁移率、玻尔兹曼常数、温度和基本电荷。扩散层和德拜厚度对微尺度泵的工作机理的理解非常重要。

电导泵在低电场强度下的工作区间称为欧姆区, 此状态下电导泵电流和电压呈线性变化。当电场强度超过一定阈值时(约为1 kV/cm, 取决于流体性质), 液体不再呈电中性。垂直于电极的外加电场会将极性相同的离子推开, 德拜层消失。解离速率随电场强度的增强而加快, 而结合速率几乎不变, 即昂萨格-维恩效应。解离电荷在库仑力作用下, 向相反极性电极移动, 在电极附近形成与电极极性相反的净电荷层: 异号电荷层。异号电荷层厚度可近似表达为, 在离子结合前离子以特征离子速度 KE_0 (E_0 为垂直于表面的电场分量的大小)迁移的距离:

$$\lambda_H \sim KE_0 \tau_\sigma = \frac{\varepsilon KE_0}{\sigma}. \quad (3)$$

施加的库仑力强度与异号电荷层厚度成正比。选择小电导率和具有较大离子迁移率和介电常数的液体, 可有助于增厚异号电荷层厚度, 从而提高电导泵性能。强电场作用下的电导泵, 电流随电压缓慢增加, 电导泵处于饱和工作状态。不同工作区间内电导泵特性, 包括压力产生、电流等与电场强度的关系都不一样。对于单相流体, 电导泵的主要工作区间和状态决定于电导数 C_0 、表征昂萨格-维恩效应的无量纲参数以及非金属边界处双电层影响等因素。

值得注意的是, 当电场强度达到一定值时(约为100 kV/cm, 与流体性质和电极材料相关), 电极表面会

发生电荷注入, 此时电流随电压的增加迅速升高。为防止电荷注入现象的发生, 电极表面要保证光滑、无尖端存在。此外, 电导泵尺寸、介电液体的击穿电压和黏性也是需考虑的重要参数。随着施加电压的连续变化, 液体中电荷产生机制也会变化, 可通过电场引起流动方向的变化来间接判断^[43,44]。最近, 我们搭建了一套实验系统用于开展直流和交流电场作用下的流动及传热研究^[45-47], 如图3所示。该系统包括高压电源、电压-电流特性测试子系统、粒子成像测速PIV系统和实验腔体。图4给出了25号变压器油(电导率 1.57×10^{-11} S/m)在针-平板电极结构下的一组实验结果。针尖的曲率约为0.1 mm, 针板间距5 mm, 针尖施加高压正电, 平板电极接地。从图中可以看出, 低电压+0.5 kV时, 靠近板电极有一个向上的流动, 对应传导机制; 对于高电压2.0 kV, 流动方向是从针尖流向平板电极, 对应注入机制; 中间存在一个过渡区, 如电压0.75 kV时, 系统几乎不流动。图中空白区域是片光源照射在针电极后的阴影导致。

2.2 理论模型

2.2.1 宏观尺度电导泵数学模型

2003年, Atten和Seyed-Yagoobi提出经典的宏观电导泵模型。之后, 该模型不断被完善, 重要进展包括考虑流场^[48]、电场强化分解的昂萨格-维恩效应^[49]、不同正负离子迁移率^[50]、传导-注入模型^[51,52]、自由离子胶束模型^[53,54]等。经典传导模型是以反应(1)为基础, 考虑两种单价的正负离子, 模型包括流场、电荷和电场计算方程。电导泵内流动的本质为包含多种电荷对流, 涉及电荷、电场、流场和温度场之间的强烈非线性耦合。考虑分解过程对中性分子浓度影响很小, 一般不需要对中性分子守恒方程进行求解。图5为二维平嵌电极电导泵结构系统, 主要包括外接高压电极、接地电极、绝缘基底和液体工质。电极可以完全嵌入绝缘基底也可以部分突出到液体中。图1(c)所示的多孔-圆环电极结构, 虽然电极形状不同, 但系统组成和工作原理类似。根据研究问题的不同, 上边界可以为对称、固体壁面和气-液界面(液膜问题), 左右边界可以为开口或者固体壁面。

对于等温不可压缩牛顿流体, 控制方程包括: 质量守恒方程

图 3 (网络版彩图)电场作用下流动实验装置示意图^[45]

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of convection induced by electric field [45].

图 4 (网络版彩图)针-板间距为5 mm不同电压下的流场. (a) +0.5 kV; (b) +0.75 kV; (c) +2.0 kV^[45]

Figure 4 (Color online) Velocity contours and vectors with different voltages in a needle-plate configuration. (a) +0.5 kV; (b) +0.75 kV; (c) +2.0 kV [45].

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

包含库仑体积力的动量守恒方程

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + q \mathbf{E}, \quad (5)$$

表示空间电荷与电场强度关系的高斯定律

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = q, \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi,$$

$$q = e_0(n_+ - n_-),$$

基于解离结合过程的正、负电荷守恒方程

$$\frac{\partial n_+}{\partial t} + \nabla \cdot (K_+ n_+ \mathbf{E} + n_+ \mathbf{u} - D_+ \nabla n_+) = k_d c_0 - k_r n_+ n_-, \quad (7)$$

图 5 (网络版彩图)嵌入式电极对电导泵结构示意图

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of electrohydrodynamic conduction pumping with a pair of flushed electrodes.

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_-}{\partial t} + \nabla \cdot (-K_- n_- \mathbf{E} + n_- \mathbf{u} - D_- \nabla n_-) \\ = k_d c_0 - k_r n_+ n_-, \end{aligned} \quad (8)$$

(4)~(8)式中, $\mathbf{u}$ 为速度矢量. 标量 $P, \mu, \Phi, c_0, n_+, n_-, q$ 分别为压力、动力黏度、电势、中性分子浓度、正离子数密度、负离子数密度和净电荷密度, K_+, K_-, D_+, D_- 代表正、负电荷离子迁移率和正、负电荷扩散系数. 已有研究大多假设正、负电荷的离子迁移率和扩散系数相同, 即 $K_+ = K_- = K, D_+ = D_- = D$. 近年来, 也有学者考虑不同正负电荷迁移率和电荷扩散系数. 长度尺寸一般采用电极间距 d 无量纲化, 其他参数无量纲化如下:

$$\begin{aligned} P &\sim \rho_m K^2 E_0^2, \quad x, y \sim d, \\ n_{\pm} &\sim n_{eq}, \quad E \sim E_0, \\ \Phi &\sim E_0 d, \quad u \sim K E_0. \end{aligned}$$

无外加电场时, 解离结合过程处于动态平衡, 以下关系式成立:

$$k_d c_0 = k_r n_+^{eq} n_-^{eq} = k_r (n_{eq})^2. \quad (9)$$

正、负离子的结合速率受电场影响较小, 可认为常数. 根据 Langevin 理论, 结合系数满足 $k_r = 2e_0 K / \epsilon$ [28], 当施加高电压时, 电场强化解离过程, 即昂萨格-维恩效应 [29]

$$K_d(|\mathbf{E}|) = K_d^0 F(w(|\mathbf{E}|)), \quad (10)$$

其中, K_d^0 为无外加电场时解离速率系数. $F, w(|\mathbf{E}|)$ 分别为昂萨格函数和强化解离速率系数:

$$\begin{aligned} F(w(|\mathbf{E}|)) &= \frac{I_1(4w(|\mathbf{E}|))}{2w(|\mathbf{E}|)}, \\ w(|\mathbf{E}|) &= \left(\frac{e_0^3 |\mathbf{E}|}{16\pi\epsilon k_B^2 T^2} \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中, I_1 是第一类一阶修正的贝塞尔函数. 当 $F(w) > 1$ 时, 存在场强解离效应. 根据以上参数, 无量纲化的传导控制方程为 [49,53,55]

$$\nabla \cdot \mathbf{u}^* = 0, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} + (\mathbf{u}^* \cdot \nabla \mathbf{u}^*) &= -\nabla P^* + \left(\frac{1}{Re_{ehd}} \right) \nabla^2 \mathbf{u}^* \\ &\quad + M(n_+^* - n_-^*) \mathbf{E}^*, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E}^* &= C_0(n_+^* - n_-^*), \\ \mathbf{E}^* &= -\nabla \Phi^*, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_+^*}{\partial t^*} + \nabla \cdot (n_+^* \mathbf{E}^* + n_+^* \mathbf{u}^*) - \alpha \nabla^2 n_+^* \\ = 2C_0(F(w) - n_+^* n_-^*), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_-^*}{\partial t^*} + \nabla \cdot (-n_-^* \mathbf{E}^* + n_-^* \mathbf{u}^*) - \alpha \nabla^2 n_-^* \\ = 2C_0(F(w) - n_+^* n_-^*), \end{aligned} \quad (16)$$

式中有 4 个无量纲特征参数 $C_0 = \frac{e_0 n_{eq} d}{\epsilon E_0}$,

$$Re^E = \frac{\rho_m K E_0 d}{\mu}, \quad M = \frac{\sqrt{\epsilon / \rho_m}}{K} \text{ 和 } \alpha = \frac{k_B T}{e_0 E_0 d}.$$

其中传导数 C_0 是区分电导泵工作区间的重要参数. 电雷诺数 Re^E 表征无量纲外加电场的作用, 可以认为是库仑与惯性力的比值. 迁移数 M 的大小取决于流体性质, 而扩散系数 α 值依赖于施加电压的大小. 昂萨格-维恩效应可以通过无量纲数 $O = \frac{e_0^3 E_0}{16\pi\epsilon k_B^2 T^2}$ 来表示. 如果考虑不同正负电荷迁移率和电荷扩散系数, 系统需要新增两个无量纲参数.

对于宏观尺寸电导泵, 电极间距显著大于非金属固体壁面处双电层的厚度, 可以忽略双电层对泵内流动的影响, 此时可以用 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{E} = 0$ 作为电势的边界条件. 其他物理量在边界上的条件(无量纲形式)在图 5 进行了描述.

对于宏观尺寸电导泵, 电极间距显著大于非金属固体壁面处双电层的厚度, 可以忽略双电层对泵内流动的影响, 此时可以用 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{E} = 0$ 作为电势的边界条件. 其他物理量在边界上的条件(无量纲形式)在图 5 进行了描述.

2.2.2 微尺度数学模型

传统宏观尺寸(电极间距为厘米级)电流体泵的一个主要的制约是需要高压(几千伏甚至几十千伏)电源提供强电场. 通过减小电极间距能够直接降低泵对电源电压的要求. 随着微加工技术的发展和微机电系统(MEMS)的兴起, 和其他类型的电磁泵一样, 微尺度电导泵(电极间距为几十微米到几百微米)也成为一个重要发展方向 [56~58]. 宏观尺度下, 双电层对于电导泵性

能的影响可忽略,但随着电导泵特征尺寸的减小,双电层对于泵性能的影响必须考虑.为深入理解传导模型和其工作状态,Vázquez等人^[59]建立了适用于不同空间尺度的传导泵模型,引入双电层中紧密层电荷密度表示非金属固体边界处的电势边界条件.Vázquez等人使用德拜-休克尔近似法估算双电层电势:

$$\Phi_{\text{EDL}} = \zeta e^{-z/\lambda_D}, \quad (17)$$

其中, z 为到固体表面的距离.当液体呈电中性时,紧密层中总电荷量与表面电荷量相等,可推导得到表面电荷密度为

$$\sigma_s = \frac{\varepsilon \zeta}{\lambda_D}. \quad (18)$$

因此,微尺度模型的非金属固体的电势边界条件为 $\mathbf{n} \cdot \nabla \Phi = \sigma_s / \varepsilon$.

另外,我们也可以回归电流体动力学中边界条件的经典表述^[60]

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) &= \mathbf{n} \cdot (\varepsilon_1 \mathbf{E}_1 - \varepsilon_2 \mathbf{E}_2) = \sigma_s, \\ \mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) &= 0, \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $\mathbf{D}_1$ 和 $\mathbf{D}_2$ 表示界面两侧固体和流体内的位移向量.这种处理要求同时求解绝缘基底内的电势和电场,并对界面电荷输运过程进行建模.

考虑了双电层影响的电导泵模型的提出,也为微尺度电导泵的创新设计提供了新的思路.但需要说明的是,以上两种微尺度泵边界处理都未经过实验进行验证,数值模拟也未有开展,有必要开展相关工作进行对比.

2.2.3 温度场模型

温度场会通过多种方式对电导泵产生影响.首先,温度出现在上面多个参数的定义式中,可以预见系统温度的整体变化会通过这些参数影响电导泵流动^[15,61].另外,温度还会影响相关的热物性和电物性参数,如黏度、介电常数、电导率等^[62].除了等温流体外,考虑到强化传热等应用,需要对非等温流体进行分析.例如,可以假定图5中的高压和接地电极分别处于高温和低温,此时需要考虑温度方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\theta) = \nabla \cdot (\chi \nabla \theta) + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}, \quad (20)$$

式中, $\chi = \lambda / \rho c_p$ 表示热扩散系数, c_p 为定压比热容.上式

中最后一项为焦耳热,由于介电液体中电流一般非常微弱,常忽略焦耳热对系统温度的影响,但对于电导率较大的液体,在微尺度环境下,焦耳热可能会产生显著影响.

温度场变化对介电液体的密度、介电常数以及离子迁移率等物性参数存在一定的影响,当施加的温度梯度较小时,温度对密度、正、负离子迁移率和介电常数的影响可以用线性变化的状态方程描述^[63].当介电常数随温度变化时,介电力不再为零.同时,由于温度差的存在,系统会受到浮升力的影响.因此,动量方程(5)中的体积力变成

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_b &= \mathbf{f}_t + \mathbf{f}_e \\ &= \rho \mathbf{g} + e_0(n_+ - n_-)\mathbf{E} - \frac{1}{2}\mathbf{E}^2 \nabla \varepsilon. \end{aligned} \quad (21)$$

以上系统会出现多个新的无量纲参数,包括和热输运相关的两个:瑞利数 Ra ($Ra = \frac{\rho g \beta \theta H^3}{\mu \chi}$),表征浮升力与黏性力的比值;普朗特数 Pr ($Pr = \mu / \rho \chi$),表示动量扩散与热扩散之比.

3 电导泵的研究现状及发展

3.1 单相流流动分布与控制

3.1.1 实验研究

实验研究多关注于电极结构、电极尺寸和液体工质等对电导泵产生的静压和动压能力的影响.在经典文献^[14]中,Atten和Seyed-Yagoobi设计了多种电极结构,开展了静压实验来验证传导机制泵的可行性,工质为R-123,一对大小圆环电极结构的结果如图6(b)所示.图6(a)为单相液体泵测试回路,主要包括储液罐、压力传感器、流量计等.Feng和Seyed-Yagoobi^[25]利用三对图1(c)所示的电极串联(孔径为1.59 mm)泵送R-123制冷剂,结果如图6(b)和(c)所示.在施加15 kV电压时获得900 Pa的静压,功耗仅为0.7 W.当外部流动为8.9 cm/s时,泵产生的动压下降为425 Pa,这是由于流体流动会通过泵内的压力损失以及改变电荷的空间分布来影响泵的压头和电流值.因此,在进行泵性能评价时,要求同时进行动压和静压性能测试.图6(b)结果对比也显示了电极结构设计对电导泵性能有重要影响.

Siddiqui和Seyed-Yagoobi^[64]创新设计了平嵌电极,实验发现流体总是由窄电极流向宽电极,与电极极性

图6 (网络版彩图) (a) 单相电流泵性能测试回路示意图; (b) 静压产生和电流与施加电压的关系; (c) 15 kV时流速与压力产生的关系^[25]. Copyright©2004, AIP

Figure 6 (Color online) (a) Schematic diagram of single-phase test loop for electrohydrodynamic pumping; (b) generated pressure head and consumed current at various voltages; (c) liquid flow velocity versus generated pressure head at 15 kV^[25]. Copyright©2004, AIP.

无关. 这种设计很大程度避免了多孔电极结构的局部阻力, 非常适用于液膜的输运^[24], 也能用于单相流体的输运. 与多孔电极相比, 平嵌电极电导压力产生能力明显要弱, 这与电极附近异号电荷层电场力的方向有关. 例如, 同样利用R-123制冷剂为工质, 厚度2~8 mm, 文献[64]中平嵌电极电导泵在15 kV只能产生35~60 Pa的压力.

人们一般认为完全对称电极结构中电极附近异号双电层库仑力会完全抵消, 不能产生流动和泵效果. Hanaoka等人^[65]首次使用对称电极泵送介电液体, 电导泵设计如图7所示. 实验发现, 流体流动方向由负电极流向正电极, 推测原因为阴离子迁移率大于阳离子迁移率. 通过实验测量得到的电极间电势的变化, 表明电极附近存在电荷聚集. 电场在异号电荷层内部得到增强, 在异号电荷层外部区域, 电场降低. 阳极周围电场强化作用尤为明显. Daaboul等人^[66,67]利用垫圈式对称电极获得了非零静压. Pearson等人^[56,68]采用316不锈钢和聚四氟乙烯, 设计了图8所示的电导泵. 高压、接地电极分别通过螺栓衔接, 并通过螺母进行固

图7 圆柱-圆柱电极和网状平板电极的电导泵设计^[65]. Copyright©2009, IEEE

Figure 7 EHD pump with nine pairs in series of rod-to-rod and meshy plates electrode assemblies^[65]. Copyright©2009, IEEE.

定处理. 表1中记录了介尺度电导泵单对电极系统的相应尺寸. 当施加电压1.5 kV时, 10对电极电导泵泵送最大流量可达到100 kg/(m² s), 最大流速为7 cm/s, 且能量消耗小于2 W. 除了电极设计以外, 多种液体工质被用于实验研究, 包括各种制冷剂(如R-123, R-134a, HCFC-123, HFE-7000, HFE-7100, HFE-7600等)、变压器油、硅油、正己烷等, 研究离子迁移率和电极结

表 1 电极与间距尺寸^[68]. Copyright©2011, IEEE**Table 1** Dimensions of electrodes and electrode spacing [68]. Copyright©2011, IEEE

名称	厚度 (mm)
接地电极	0.127
电极间距	0.127
高压电极	0.381
电极对间距	1.588

图 8 (网络版彩图)电极、电极间距和电导泵实物图^[68]. Copyright©2011, IEEE**Figure 8** (Color online) Physical picture of electrodes, electrode spacing and EHD conduction pumping [68]. Copyright©2009, IEEE.

构和布置对电导泵性能的影响。

近年来, Seyed-Yagoobi小组^[69,70]首次提出了柔性电导泵的概念, 采用丝网印刷技术, 将银导电油墨沉积于柔性聚酯基板之上, 制作出不同规格的柔性电导泵。他们的实验结果证明柔性泵无论是弯曲还是回到原始状态, 均不显著损失泵的性能。柔性电导泵与传统刚性电导泵性能相似, 产生速度在同一数量级。Cacucciolo等人^[33]采用成熟的弹性体加工技术, 创新设计了电极嵌入式可伸缩柔性泵。需要说明的是, 文献^[33]

关注的是加工技术与电流体泵的结合, 因此同时设计了注入泵和传导泵。如图9所示, 泵的主体材质为聚二甲基硅氧烷(PDMS), 重量仅1 g, 其尺寸为75 mm×19 mm×1.3 mm, 流体通道尺寸为55 mm×2 mm×0.5 mm。正负电极尺寸、电极间距均为0.5 mm, 电极对间距为1 mm。他们选用碳基和银基两种电极材料, 液体工质为Novec 7100和Fluorinert FC-40。通过与机械微泵的对比测试, 证明了电流体泵优良的性能和更低的电能消耗。而且, 电流体泵可通过改变施加电压的极性实现流体反向流动, 通过电极对数量的增加实现泵能力的提升。

文献^[33]还展示了可伸缩泵在可穿戴设备热控和软体机器人领域的潜在应用。图10(a)和(b)展示了可伸缩泵与弯曲流体致动器结合制备的流体肌肉。泵的入口与液体储液室相连, 出口与软致动器室相连。当其中充满介电液体, 施加电压时, 软泵驱动液体从储液器流入弯曲室, 导致软致动器发生弯曲, 且随电压增大, 弯曲角度亦增大, 如图10(b)所示。具有电动柔性可与伸缩性的EHD泵, 在肌肉式驱动器上呈现的良好性能, 展现了其在软机器人等流体驱动软系统领域的广阔应用前景。

流体强化传热系统一般存在多个蒸发器或热交换器。系统分支管路流体流量分布不均, 易导致传热系统局部高温发生。电导泵作为一种简单、主动的流体分布与控制方法, 能有效解决此类问题。Feng和Seyed-Yagoobi^[71]首次将多孔电极电导泵安装在双分支管路单相流体系统中。机械泵作为系统流量产生的主要方式, 电导泵作为辅助泵。Yang等人^[72~75]应用文献^[68]中设计的电导泵, 进行单相流体流动分布与控制实验。实验管路系统如图11所示。单相流实验中, 仅启用其中一

图 9 (网络版彩图)可伸缩电流体泵^[33]. Copyright©2019, Springer Nature. (a) 可伸缩电流体泵示意图; (b) 被拉伸的碳基电极泵**Figure 9** (Color online) Stretchable EHD pump [33]. Copyright©2019, Springer Nature. (a) Schematic diagram of the stretchable EHD pump; (b) the carbon-based electrode pump was stretched.

图 10 (网络版彩图)可伸缩泵与弯曲流体驱动器结合而成的流体肌肉^[33]. Copyright©2019, Springer Nature. (a) 流体肌肉纵向横截面; (b) 测量的弯曲角度随电压的变化

Figure 10 (Color online) Fluidic muscles obtained by bonding a stretchable pump to a bending fluidic actuator [33]. Copyright©2019, Springer Nature. (a) Longitudinal cross-section of the fluidic muscle; (b) measured bending angle as a function of the applied voltage.

图 11 单相流流动分布控制实验系统^[72]. Copyright©2015, IEEE

Figure 11 Experimental system of single-phase flow distribution control [72]. Copyright©2015, IEEE.

个分支管路中的电导泵, 其他电导泵处于关闭状态. 如图12所示, 起初每一分支流量平均分布1.5 mL/min. 随着施加的电压升高, 分支中流量开始出现差异. 当电压达到1.3 kV时, 未启动电导泵分支流量为0. 随着电压的进一步增大, 管路中甚至出现了反向流动现象. Yang

图 12 流量分布控制实验结果^[72]. Copyright©2015, IEEE

Figure 12 Results of flow distribution control experiments [72]. Copyright©2015, IEEE.

等人同时进行了分支电导泵反向安装试验, 发现与同向安装相比, 反向安装更有利于流量的重新分配及不均匀分配的校正.

日本学者Hanaoka等人^[76,77]很早注意到Atten和Seyed-Yagoobi电导泵开创性的工作, 基于同样的原理设计了一种电导射流泵. 图13(a)中展示了Hanaoka等人设计的传导电极与锥形喷嘴结合的电导射流泵, 两侧布置小电极对的设计是为了由底部电极产生的主流在锥形孔内具有一个径向速度. 相比于无锥形喷嘴结

图 13 (a) 带有锥形喷嘴的电极系统示意图^[77]; (b) 液体射流模式($V = 3 \text{ kV}$)^[77]. Copyright©2006, John Wiley and Sons

Figure 13 (a) Schematic diagram of electrode system with conical nozzle^[77]; (b) typical patterns of liquid jet ($V = 3 \text{ kV}$)^[77]. Copyright©2006, John Wiley and Sons.

构, 泵所产生的射流更加集中, 流速更快如图13(b)所示. 在施加15 kV电压, HFC43-10为工质时, 图13(a)中的电导射流泵可产生1.1 m/s的流速.

现有电导泵的实验主要关注的是压力产生能力、整体的流速和电流-电压等信息, 对泵内流场的测量较少. 近年来, 电导泵内的流场可视化及速度场测量方面也取得一定进展. Hemayatkhah等人^[78]通过往薄膜界面注入染料, 实现了电导泵流场的可视化. 为更好地观测电流动, 研究人员利用粒子成像测速(PIV)技术进行流场测量. 利用PIV进行电对流研究的一个主要难题在于在电场环境下引入示踪粒子可能改变电场和流场. 这一难题可以通过选择特殊的示踪粒子材料和浓

度来部分克服. Ryu等人^[20]用PIV对昂萨格-维恩效应泵流动进行了测量, 示踪粒子为荧光聚苯乙烯微球. Vasilkov等人^[79,80]对另一种昂萨格-维恩效应泵流动以及针-板结构电荷注入-传导机制电对流进行了PIV流场测量, 直径1~10 μm 的硼硅酸盐空心球作为示踪粒子. 法国普瓦捷大学Daaboul等人^[81,82]较为系统地开展了介电液体电流动PIV测量工作, 讨论了示踪粒子材料和浓度对测量结果的影响. 他们早期研究由电荷注入引起的流动^[83], 近年来开始关注电导机制引起的流动^[84]以及电荷注入-传导的过渡过程^[43]. 图14展示了一个封闭墙体内, 9对非对称平嵌电极(一对电极宽度分别为1.3和3.8 mm)的PIV测量结果. 流动工质为HFE

图 14 (网络版彩图)封闭腔体内电导泵流动PIV测量^[84]. Copyright©2019, IEEE. (a) 实验腔体和电极布置示意图; (b) 5 kV电压500 s的PIV流场结果

Figure 14 (Color online) Results of flow field driven by conduction and measured by PIV in a confined cavity^[84]. Copyright©2019, IEEE. (a) Schematic of the experimental cell and electrodes; (b) PIV results of flow field at 500 s with 5 kV.

7000, 施加电压为5 kV. 实验结果显示, 电导机制确实能引起流动, 但在500 s以后腔体内的流动还是比较混乱的. 最近, Perri等人^[85,86]利用双PIV相机同步测量技术测量了圆锥-平板电极间电对流在圆锥电极附近以及整体的流场结构, 首次在实验观测到了环形Moffatt涡. 电导泵PIV测量工作还较少, 且都是在封闭腔体内进行, 没有外部流动. 另外, PIV测量结果显示简单的平板嵌入电极电导泵在低电压下的流场结构也很混乱^[83,84], 说明电导泵内复杂流动特征和机理还有待深入研究. 其他更复杂电极结构电导泵PIV测量还未有开展.

微尺度电导泵(电极间距为几十微米到几百微米)是近年来电流体泵的研究热点之一. 早在20世纪90年代, 已经出现多种微尺度注入泵和感应泵^[87,88], 而微尺度传导泵2011年才首次报道^[56]. Pearson和Seyed-Yagoobi^[56]设计了一种平板嵌入式微泵, 液体通道直径约为0.254 mm, 电极间距尺寸约为250 μm . 在800 V电压下获得了约1 mL/min的体积流量速率. 施加0.8 kV电压时, 泵所产生的最大静压约为205 Pa. Mahmoudi等人^[57]设计了一种类似于蚊香结构的微电导泵, 电极平均间距286 μm . 对于变压器油工质的静压测试表明, 泵可以在300~1500 V范围内有效工作, 在1500 V获得了100 Pa压力. Sato等人^[89]设计了一种渐缩通道微传导泵, 电极间距最小尺寸为270 μm , 如图15所示. 他们对100对串联的电极对进行了静压实验, 在1.2 kV电压时获得了400 Pa的压力. 微电流体泵的一个伴随问题是如何考虑非金属电极表面双电层的影响. 经估算, 微尺度电导泵内非金属电极表面双电层厚度(德拜长度)在1~30 μm . 当电极间距为几十到几百微米时, 双电层的影响不能忽略.

图 15 (网络版彩图)多对电极配置概念图^[89]. Copyright©2017, the Chemical Society of Japan

Figure 15 (Color online) Concept diagram of multi-pair electrode configuration^[89]. Copyright©2017, the Chemical Society of Japan.

上述电导泵实验研究中, 电极材料多采用不锈钢、金、银、铜作为电极材料. 银、铜、金都具有高导电性、柔软及良好的延展性, 可应用于柔性伸缩泵的制作, 但金、银价格昂贵. 不锈钢的导电性虽弱于金、银、铜等金属, 但其具有硬度高、易抛光加工、耐腐蚀、价格经济实惠等优点. 实验研究中, 多尺度电导泵的性能、工作介质、电极材料及在不同的电场强度下, 泵所产生的流速和压头详细记录在表2中. 电极材料对泵性能的影响机理还鲜有开展, 是未来一个重要的研究方向.

3.1.2 数值模拟和理论研究

数值模拟是电导泵机理研究和优化设计的重要方法. 随着现代计算机能力的不断发展, 数值计算和数值模拟技术开始被广泛地应用于电导泵的研究和创新设计. 电导泵的本质为包含多种电荷多物理场耦合问题, 涉及电荷、电场、流场和温度场之间的强烈非线性耦

表 2 实验研究中的多尺度电导泵性能

Table 2 Performance of multi-scale EHD conduction pumping in experimental studies

电导泵实验研究	电极材料	介电液体	施加电压 (kV)	流速 (mL/min)	压头 (kPa)
多孔电极电导泵 ^[64,72]	镀金不锈钢	R-123	15	419.4	0.425
介尺度平嵌电极电导泵 ^[69]	316不锈钢	R-123	1.5	3.3	0.6
微尺度平嵌电极电导泵 ^[68]	不锈钢	R-123	0.8	1.0	0.21
微尺度环形电极电导泵 ^[89]	镀铜的工业化液晶聚合物	N-hexane变压器油	1.5	—	0.1
微通道非对称电极电导泵 ^[90]	金	HFE-7300	5	—	0.13
微尺度柔性可伸缩泵 ^[33]	碳黑	HFE-7100	5.6	6.0	7
	银	FC-40	10	—	14

合, 理论分析一般很困难. 其次, 电对流中的电荷、电场以及空间温度场都很难从实验中直接测量, 数值模拟可提供这些变量的空间分布, 有利于流动机理分析. 另外, 电导泵往往会涉及多维、复杂边界、非稳态(包括湍流)流动, 电极优化设计和布置依赖数值模拟.

多物理方程之间的强非线性耦合以及电荷输运方程的强对流特性是单相电导泵数值模拟的两个主要难点. 虽然电导泵的数值模拟工作发展比较晚, 但从本质上看, 用于求解单种电荷(注入机制)电对流、气体放电离子风、电渗流的数值方法几乎可以直接应用于电导泵的模拟. 早期混合求解技术使用较多, 即发展一种方法单独或者耦合求解电场-电荷分布, 再用另一种方法求解流场和温度场^[90-92]. 近年来, 利用单一方法(如有限体积法、有限元法、格子-Boltzmann方法等)的求解全部物理场的策略更受欢迎. 文献^[93]对电场和电荷分布数值方法进行了总结. 为了减少电荷输运方程强对流占优特性引起的数值扩散或者非物理振荡, 人们发展了粒子类方法(particle-in-cell, PIC)、特征线法(method of characteristics, MoC)、通量校正传输法(flux-corrected transport, FCT)等方法. 本文通讯作者曾与Traoré等人合作将有限体积法与TVD(total variation diminishing scheme)格式相结合用于介电液体电对流和电热对流的研究^[94-96], 其中有限体积法用于求解整个电对流耦合方程组, TVD格式用于处理对流占优的电荷密度守恒方程. 该求解方法应用于二维刀片-平板电极结构^[97]和三维方腔内平嵌电极^[98]电导泵的数值分析. 另外, 该求解策略已经被植入了开源数值平台OpenFOAM¹⁾, 并拓展到多相问题^[99,100]. 近年来, 一些新的方法也开始应用于单种电荷电对流问题, 包括格子-Boltzmann方法(LBM)^[101-107]、谱元法^[108]、散统一动理学方法(DUGKS)^[109]、能量稳定有限元法(energy stable FEM)^[110]、能量无条件稳定格式(unconditionally energy stable schemes)^[111]等. 其中, LBM已经被拓展应用于电导泵问题^[112]. 事实上, LBM在电流体领域的应用发展非常迅速, 除了单相流以外, 已经被广泛应用于多相电流体动力学问题.

最早, Jeong等人^[23]基于有限体积法求解了电导泵静压模型. 紧接着, 他们考虑了流场和昂萨格-维恩效

应^[25]. 之后, 人们开展了大量电导泵性能影响参数研究, 尤其是电极尺寸、布置和正负离子迁移系数等物性参数. Yazdani和Seyed-Yagoobi^[50]模拟研究发现, 对于对称电极, 当正负离子迁移率之比 $b_r=1$ 时, 高压和接地电极处产生了大小相同、流向相反的一对涡旋, 如图16(a)所示, 其中蓝(左侧)、红(右侧)色线分别代表接地和高压电极. 当离子迁移率之比 $b_r=2$ 时, 流场发生改变, 通道内产生了从高压电极到接地电极的流动, 且电极处涡旋产生的位置发生了改变, 如图16(b)所示. 原因在于正离子迁移率大于负离子, 从而带动周围液体流向接地电极. 当缩小接地与高压电极比 ζ 为0.35时, 结果表明电极结构的变化, 改变了流场结构, 液体流动方向由窄电极流向宽电极, 主要原因在于电极尺寸变化, 异号电荷层的厚度以及内部的离子分布也发生了变化, 使得库仑力方向由窄电极指向宽电极, 如图17所示.

另外, 考虑到工作电压的连续变化时, 液体中电荷产生机制也可能从传导向注入过渡, 研究者也开始研究注入机制对电导泵性能的影响. Yazdani和Seyed-Yagoobi^[52,113]通过数值模拟研究, 量化电荷注入对电导泵性能的影响, 得出双极电荷注入对流动的影响不如单极电荷注入. Nishikawara等人^[51]模拟研究了传导、注射单独作用以及二者的协同作用. 结果表明, 作用于正向流动的库仑力, 随传导、注入的协同作用而增强, 电导泵产生的压力比二者单独作用产生压力之和.

传统的电流体泵主要关注电极附近的强电场区

图 16 (网络版彩图)流线和对称电极配置. (a) $b_r=1$ 和(b) $b_r=2$ ^[50]. Copyright©2014, Elsevier

Figure 16 (Color online) Flow streamlines and symmetric electrode configuration. (a) $b_r=1$ and (b) $b_r=2$ [50]. Copyright©2014, Elsevier.

1) Liu Q, Wu J. The effect of different interface capture methods on the simulation accuracy of droplet deformation under electric field (in Chinese). Chin J Comput Mech, Accepted [刘强, 吴健. 不同界面计算方法对液滴在电场作用下变形数值模拟精度的影响. 计算力学学报, Accepted]

图 17 (网络版彩图)流线和非对称电极配置 $\xi=0.35$ ($b_r=2$)^[50]. Copyright©2014, Elsevier

Figure 17 (Color online) Flow streamlines and asymmetric electrode configuration $\xi=0.35$ ($b_r=2$)^[50]. Copyright©2014, Elsevier.

图 18 (网络版彩图) (a) 近孔处电场强度(V/m)和(b)阳离子浓度^[79]. Copyright©2017, AIP

Figure 18 (Color online) (a) The electric field strength (V/m) and (b) the positive-ion concentration normalized to the equilibrium concentration in a region near the hole^[79]. Copyright©2017, AIP.

域, 电极附近强电场提高有利于电导泵性能提升, 但也带来了电荷注入可能发生的风险. Vasilkov等人^[79,114]提出了一种创新思想可利用远离电极处的强电场解离效应的同时避免电极处的离子注射. 在图18所示的研究系统中, 两平行电极板间放置一带小孔的绝缘板(孔径1.04 mm), 施加电压后在孔附近产生了一个远离电极表面的强电场区域. 图18为施加30 kV电压时, 近孔处的电场强度和阳离子浓度, 图19为对应的净电荷密度及流场分布. 结果表明, 当系统加强电场时, 绝缘板中心孔处电场强度约为 10^7 V/m, 而电极表面电场强度小于 10^5 V/m, 可避免电荷注入. 中心孔强电场区的非线性电流电压特性, 仅由场强解离现象引起. 阴、阳离子主要分布在中心孔两端, 流体流动未穿过中心孔. 中心孔形状的改变可使孔两侧出现不均匀的电场分布, 即可产生通过中心孔的净流^[115]. 文献^[79,115]还开展了实验研究, 测量了压降和流速, 数值和实验结果总体吻合良好.

泵性能与电场强度密切相关, 随着电场强度增加,

图 19 (网络版彩图)净电荷密度(C/m^3)(a)和流场速度大小(m/s)(b)^[79]. Copyright©2017, AIP

Figure 19 (Color online) (a) The net space charge density (C/m^3) and (b) the velocity magnitude (m/s)^[79]. Copyright©2017, AIP.

昂萨格-维恩效应也更加显著, 会对电导泵性能产生显著影响. 2019年, Vázquez等人^[59]以平行平板电极对象推导了昂萨格-维恩效应对电导泵压力产生以及电流的影响, 这是理论研究的一个重要进展. 他们的研究表明, 电导泵的工作区间同时决定于电导数 C_0 和一个与昂萨格-维恩效应相关的无量纲数 β . 如图20所示, 当电导泵系统处于饱和区($C_0 < 1$), 如不考虑昂萨格-维恩效应($\beta=0$), 异号电荷层相互叠加, 整个区域几乎不带电(图20(a)), 泵产生的压力很小(图20(b)); 当考虑昂萨格-维恩效应时($\beta>0$), 强化分解产生的自由电荷能及时补充异号电荷层内的电荷损失, 提高泵的压力产生. 这一理论分析为电导泵(尤其是微尺度泵)的创新设计提供了新的思路. 另外, 他们对平嵌电极微尺度电导泵进行了二维数值模拟, 并与实验结果^[56]进行了对比分析, 如图21所示. 图中给出了电流和静压头随电场强度的变化. 微通道的尺寸为 $50 \mu m$, 流体质为制冷剂R-123, 电导率 10^{-7} S/m. 需要说明的是, 由于部分物性参数(尤其是离子迁移系数)未知, 这种对比只能说明量级是一致的. 完全精确的数值和实验对比还未有报道, 是未来需要解决的一个重要问题.

最近, Wang等人^[112]发展了一种求解传导泵的LBM方法, 并数值分析了二维方腔内尺寸不等平板电极结构电对流问题. 为了验证数值算法, 他们求解了平行电极板-金属丝结构下由电导机制引起流动问题. 线电极的直径为1 mm, 流体质为添加了少量活性剂的十二烷. 如图22所示, 该问题存在流场可视化结果(图22(a))及利用粒子追踪测速(PTV)技术测量的速度分布^[116], 因此可视为电导泵数值模拟的一个基准算例. 图22(b)中的数值结果包括利用COMSOL计算的FEM

图 20 (网络版彩图) 平行平板传导泵静压模型. (a) 正负电荷密度(p 和 n)以及电场分布; (b) 压力产生^[59]. Copyright©2019, AIP
Figure 20 (Color online) EHD conduction pump with static pressure model of parallel plate. (a) The density of positive and negative charges (p and n) and the distribution of electric fields; (b) pressure generation^[59]. Copyright©2019, AIP.

图 21 (网络版彩图) 微尺度电导泵数值和实验对比^[59]. Copyright©2019, AIP

Figure 21 (Color online) Comparison between numerical simulation and experiments of EHD conduction micro-pump^[59]. Copyright©2019, AIP.

结果^[116,117]和我们利用OpenFOAM计算的FVM结果²⁾, 均与实验结果吻合良好. Talmor和Seyed-Yagoobi基于文献^[58]数值研究了微尺度泵的流动方向和流体惯性对异号电荷层结构以及流量分布控制的影响^[118].

综上, 宏观尺寸单相介电液体电导泵的数理模型已经成熟, 微尺度泵模型还有待进一步完善. 电导泵数值模拟和分析的工作在逐渐增加, 但还停留在基础算法开发、简单模型问题分析、二维层流计算阶段. 对复杂电极结构、全尺寸泵优化设计、电湍流模型、电导泵的尺度效应、与温度场和相变过程耦合等方面工作均鲜有开展.

3.2 两相流流动分布与控制

电导泵可应用于各种类型的传热强化问题, 包括单相流、气-液两相和沸腾等相变传热. 液膜在低重力空间传热传质中有重要用途, 感应泵已经被用于液膜运输. 2009年, Siddiqui和Seyed-Yagoobi^[64]首次通过实验展示了电导泵在液膜的运输方面的潜力. 他们发现泵送液膜效果与电极结构和液膜厚度密切相关, 平嵌和多孔电极分别适合薄和厚液膜. 同时, Yazdani和Seyed-Yagoobi^[119]对平嵌电极结构液膜运输进行了数值模拟. 他们假定气液界面在液相流动过程中始终保持水平, 界面处退化为滑移边界条件. Gharraei等人^[120]同样基于滑移边界, 数值分析了平嵌电极尺寸和正负离子迁移系数对比液膜泵送的影响. 滑移边界假设与实验观察到的液膜界面变形(如图23所示)明显不符. Yazdani等人^[121]引入流体体积法(VOF)进行界面追踪, 得到了界面变形. 但他们仅将VOF方法与相变模型

2) Selvakumar R D, Du Z L, Wu J. Heat transfer intensification by EHD conduction pumping for electronic cooling applications. submitted.

图 22 (网络版彩图)线-平电极电导泵流场可视化及数值和实验对比。(a) 线-板结构示意图和流场可视化结果^[116]。Copyright©2014, IEEE; (b) 电压1 kV, 速度沿线 $y=3.75$ mm的分布

Figure 22 (Color online) Flow visualization and comparison between numerical simulation and experiments of EHD conduction with wire-plate configuration. (a) Schematic diagram of wire-plate configuration and flow visualization [116]. Copyright©2014, IEEE; (b) comparison of y -velocity profile along $y = 3.75$ mm at 1 kV.

图 23 (网络版彩图)基于染料电导泵液膜输运气-液界面可视化^[78]。Copyright©2011, Elsevier

Figure 23 (Color online) Achieved the visualization of fluid-liquid interface of EHD conduction pumping liquid film by using the dye [78]. Copyright©2011, Elsevier.

耦合, 没有考虑电荷在界面上的输运和电场麦克斯韦应力对于界面的作用, 因此他们的数值结果与实验结果还有差距. 实验已确认气-液界面电荷能够影响界面

的轮廓, 特别是在薄液膜的情况下^[122]. 因此, 未来需要对界面电荷输运和电场力在界面处的准确建模开展工作.

我们基于开源平台OpenFOAM发展了一套气-液两相电流体算法, 考虑了界面变形和界面电场力^[123]. 图24给出了利用该算法得到的电导泵送R-123冷却剂液膜的模拟结果. 可以看出电极附近明显的漩涡流动, 正负电荷在极板附近积聚, 界面由于液体层内的流动出现了明显的变形, 这与实验^[122]观察到的现象一致. 最近, Jafari等人^[15]考虑液体性质和工作温度对电导泵送液膜的影响. 实验研究发现, 液体工质温度越高, 电导泵泵送液膜的流速越快, 传热性能越好, 但温

图 24 (网络版彩图)电导泵送冷却剂液膜的数值模拟结果

Figure 24 (Color online) Numerical result of dielectric liquid film transported by EHD conduction pumping.

度对于液体工质参数及传导机制的影响,未深入探讨.温度对于泵性能的影响,还需要深入的机理研究和分析.

Feng和Seyed-Yagoobi^[124]将文献[23]中设计的电导泵应用于两相流分布控制实验中.因电导泵泵送仅作用于液相,所以效率低于泵送单相液体. Jeong和Dion进一步探究了两相流热控循环中电导泵性能^[125]. Yang等人^[126]应用文献[68]中的介尺度电导泵,进行了两相流流动分布控制实验,工作介质为制冷剂HCFC-123.结果表明,电导泵通过调整分支管路的流量分布,可有效控制两相流流动分布,有利于两相流系统从干涸状态的恢复.

3.3 强化传热应用研究

3.3.1 强化对流散热

电导泵可应用于单相、两相流动分布与控制,已展现了在液膜输运、强化散热等领域的广阔应用前景. Yazdani和Seyed-Yagoobi^[128,127~131]利用传导机制,产生高速射流冷却加热表面、进行球型储液器的热均匀化处理以及增强流速通道来流的强迫对流,提高系统的散热能力. Nourdanesh与Esmaeilzadeh^[132]采用平嵌电极泵送煤油,进行传导强化对流散热与自然对流散热对比实验研究. Nourdanesh等人^[133]在文献[132]的实验系统中加入了机械泵,探讨机械泵与电导泵泵送方向对于系统传热的影响.结果表明,液膜厚度较小时,顺流模式的液体界面温度高于逆流模式,传热系数更

高,但随着膜厚增加,顺流产生的涡旋难以触及液体表面以及增强散热.此时逆流模式产生的不规则涡旋,导致流体整体温度更均匀. Mirzaei等人^[134,135]构建了一种新型的EHD传导强化双管换热器,在冷却管中布置平嵌电极,增强液体对流换热.

Cacucciolo等人^[33]将柔性泵嵌入在纺织手套内,进行体温热调节,如图25所示,在热调节循环中,蛇形柔性管固定在环流动,以此来降低加热器温度,达到温度调节的目的.从红外图像可看出,泵开始工作一段时间后,加热器处温度得到明显改善.应用于皮肤传感器中的可伸缩柔性电流体泵,展现了在可穿戴、流体驱动软系统散热领域的巨大潜在应用价值.

3.3.2 强化相变、沸腾传热

除了液体内部,在不同相的界面处也存在显著电场效应,因此电导泵对强化相变、沸腾传热也有重要影响.为证实独立使用电导泵驱动的传热系统的可行性, Seyed-Yagoobi团队^[26,136~138]进行了两相传热设备的长时间运行实验.每天运行7 h,系统成功地运行了105 h,系统在仅消耗0.0042 W的功率条件下始终能够实现最少5 W的热传输.作为空间在轨测试的先行实验, Seyed-Yagoobi团队还多次通过失重飞机进行变重力条件电导泵强化传热实验,验证了电导泵应用于单相流、流动沸腾、池内沸腾、液膜沸腾时,性能几乎不受重力的影响^[138].实验结果有力地证实了电导泵长期应用于航空散热系统的应用前景.传导机制还可应

图 25 (网络版彩图)嵌入纺织手套中的用于调节体温的可伸缩泵^[33]. Copyright©2019, Springer Nature

Figure 25 (Color online) Stretchable pump embedded in a textile glove for on-body thermal regulation ^[33]. Copyright©2019, Springer Nature.

用于提高池沸腾临界热流密度、强化沸腾传热^[139~142]. Pearson和Seyed-Yagoobi^[143]创新设计了同心环形的结合电极布置,使容器周围液体从不同方向流向中心加热蒸发区.在给定热通量的条件下,传导机制产生可观的循环速度湿润中心液体沸腾区与液膜几乎停滞无传导机制的状态相比,蒸发器表面液体过热温度显著降低.

为进一步提高强化沸腾传热效果,Patel和Seyed-Yagoobi^[144]在铜片加热器的上方布置了电泳电极,结合环形电极强化沸腾传热.图26为液体薄膜沸腾实验系统装置,环形电极利用传导机制驱动周围液膜湿润加热区表面,而电泳电极在加热区上方建立了一不均匀电场,依靠介电泳力促进气泡的排出.当液膜厚度为2 mm、环形电极与电泳电极板上分别施加2与2.5 kV电压,热流密度为24.1 W/cm²时,传导与感应机制的结合与不存在电场实验相比,传热系数提高了1217%.感应与传导机制结合强化沸腾传热的实验研究为地面、空间热管理应用提供了重要的实验数据.超高热流密度(>1000 W/cm²)电子器件冷却、小型化

图 26 (网络版彩图)液体薄膜沸腾实验系统^[144]. Copyright©2017, ASME

Figure 26 (Color online) Experimental system of liquid film boiling ^[144]. Copyright©2017, ASME.

散热系统是未来全球共性挑战问题之一, 电导泵送流体微通道相变冷却是低重力等特殊环境下的极有潜力的一种技术, 但是还有许多基础性科学问题需要研究.

4 总结与展望

基于介电液体自由电荷传导模型的电流体动力学传导泵是近年来受到关注的一种流动产生与控制技术, 具有易小型化制作、运行可靠等独特的优势, 可广泛应用于微通道流体流动分布与控制系统、电子冷却及强化散热等领域. 当前, 国际上针对电导泵的研究已经从宏观尺寸单相流向微尺度两相流发展, 同时出现了柔性可伸缩泵等创新设计, 有望应用于可穿戴、软机器人等流体驱动的软系统领域. 国内对电流体动力学的研究起步较晚. 与磁流体泵相比, 国内学者对电流体泵的关注少很多, 研究还未形成体系, 代表性的工作包括: 北京工业大学于翹等人^[21,145~147]基于 MEMS 加工技术制作的微注入泵、华南理工大学 Feng 等人^[58]基于微加工制作的一种微电导泵. 山东大学李斯盟等人^[148]设计了针-环与针-网两种电极结构的 EHD 泵. 这些研究主要关注泵的性能, 没有对机理进行深入探索. 我国在电导泵领域所进行的理论与实验研究工作较少, 还处于起步阶段, 亟需加强.

本文从电流体动力学泵的背景、电导泵的工作原

理、数学物理模型、研究现状和前沿进展等方面进行总结. 未来工作中, 首先, 需考虑电极材料以及液体工质(种类及电导率等关键物性参数)对电导泵总体性能及长期工作能力的影响. 其次, 结合电导泵工作环境及强化传热领域的应用, 明确流体工质物性参数与温度的依赖性, 深入分析温度对于传导机制的影响. 此外, 关于微尺度电导泵非金属电极表面边界的处理方式还需要开展实验验证, 并将其应用于微尺度传导泵的创新设计中. 微尺度机理和优化设计研究的最终目的是, 结合优化微流动和相变传热, 形成一种先进航天器电子元器件热管理方案, 促进其在高热流密度芯片和微系统强化散热等领域的应用. 另外, 电导泵还有望用于低温制冷剂、推进剂和燃料的在轨输运以及智能存储等领域. 未来, 在数值方法方面, 一方面需要进一步完善单相电流体的算法体系(如复杂边界处理、湍流模型、边界双电层等), 另一方面要拓展算法到沸腾、流-固耦合等多相问题甚至相变过程. 在实验方面, 需要发展电导率和离子种类可控技术, 同时需要减少粒子成像测速技术在电流动测量的可能误差. 我们可以预见, 随着电导泵领域的深入研究, 创新设计的微尺度电导泵或柔性伸缩泵, 将在微尺度传热系统及流体驱动软系统等领域, 展现其巨大的优势和应用价值. 电导泵的研究也有利于促进流体力学与电磁学、传热学、电化学等学科的交叉和融合.

参考文献

- 1 Laser D J, Santiago J G. A review of micropumps. *J Micromech Microeng*, 2004, 14: 35
- 2 Brennen C E. *Hydrodynamics of Pumps*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011
- 3 Wang Y N, Fu L M. Micropumps and biomedical applications—A review. *Microelectron Eng*, 2018, 195: 121–138
- 4 Xu Z B, Yang S P, Liu G L, et al. Development of micropump research (in Chinese). *Chin Hydraul Pneumat*, 2013, 6: 7–12 [许忠斌, 杨世鹏, 刘国林, 等. 微泵的研究现状与进展. *液压与气动*, 2013, 6: 7–12]
- 5 Iverson B D, Garimella S V. Recent advances in microscale pumping technologies: A review and evaluation. *Microfluid Nanofluid*, 2008, 5: 145–174
- 6 Seyed-Yagoobi J. Electrohydrodynamic pumping of dielectric liquids. *J Electrostatics*, 2005, 63: 861–869
- 7 Ramos A. *Electrokinetics and Electrohydrodynamics in Microsystems: Electrohydrodynamic Pumping in Microsystems*. Vienna: Springer, 2011
- 8 Talmor M, Seyed-Yagoobi J. Electrohydrodynamically Augmented Internal Forced Convection. In: Kulacki F, ed. *Handbook of Thermal Science and Engineering*. Cham: Springer, 2018
- 9 Lai F C. EHD gas pumping—A concise review of recent development. *J Electrostatics*, 2020, 106: 103469
- 10 Pickard W F. Ion drag pumping. I. Theory. *J Appl Phys*, 1963, 34: 246–250
- 11 Yoon D H, Sato H, Nakahara A, et al. Development of an electrohydrodynamic ion-drag micropump using three-dimensional carbon micromesh electrodes. *J Micromech Microeng*, 2014, 24: 095003

- 12 Melcher J R. Traveling-wave induced electroconvection. *Phys Fluids*, 1966, 9: 1548–1555
- 13 Holtappels M, Stubbe M, Gimsa J. Ac-field-induced fluid pumping in microsystems with asymmetric temperature gradients. *Phys Rev E*, 2009, 79: 26309
- 14 Atten P, Seyed-Yagoobi J. Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry. *IEEE Trans Dielect Electr Insul*, 2003, 10: 27–36
- 15 Jafari M, Farrokhi N, Esmaeilzadeh E. Effects of working temperature and fluid physical properties on heat transfer enhancement in conduction pumping: An experimental study. *Int J Thermal Sci*, 2020, 156: 106471
- 16 Yao S, Santiago J G. Porous glass electroosmotic pumps: Theory. *J Colloid Interface Sci*, 2003, 268: 133–142
- 17 Alizadeh A, Hsu W L, Wang M, et al. Electroosmotic flow: From microfluidics to nanofluidics. *Electrophoresis*, 2020, 42: 834–868
- 18 Frants E A, Ganchenko G S, Shelistov V S, et al. Nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule for weak and moderate external electric fields. *Phys Fluids*, 2018, 30: 22001
- 19 Morgan H, Green N G, Ramos A, et al. Control of two-phase flow in a microfluidic system using ac electric fields. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 254107
- 20 Ryu J C, Park H J, Park J K, et al. New electrohydrodynamic flow caused by the onsager effect. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 104502
- 21 Yu H, Yu J, Ma C F. Design, fabrication and experimental research for an electrohydrodynamic micropump. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53: 2839–2845 [于翮, 俞坚, 马重芳. 电液动力微泵的制作及实验研究. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 1201–1207]
- 22 Onsager L. Deviations from Ohm's law in weak electrolytes. *J Chem Phys*, 1934, 2: 599–615
- 23 Jeong S I, Seyed-Yagoobi J. Innovative electrode designs for electrohydrodynamic conduction pumping. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2004, 40: 900–904
- 24 Gharraei R, Esmaeilzadeh E, Hemayatkhah M, et al. Experimental investigation of electrohydrodynamic conduction pumping of various liquids film using flush electrodes. *J Electrostatics*, 2011, 69: 43–53
- 25 Feng Y, Seyed-Yagoobi J. Understanding of electrohydrodynamic conduction pumping phenomenon. *Phys Fluids*, 2004, 16: 2432–2441
- 26 Patel V K, Seyed-Yagoobi J. Long-term performance evaluation of microscale two-phase heat transport device driven by EHD conduction. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2014, 50: 3011–3016
- 27 Andy Baron. WPI Research May Help Astronauts Keep Cool on Their Way to Mars. <https://www.wpi.edu/news/wpi-research-may-help-astronauts-keep-cool-their-way-mars> 2018-04-18/2021-03-07
- 28 Yazdani M, Seyed-Yagoobi J. Thermal homogenization in spherical reservoir by electrohydrodynamic conduction phenomenon. *J Heat Transfer*, 2009, 131: 94502
- 29 McGuirk C D, Barruetabena J, J Ouellette, et al. Next generation, smart fluid storage tank for space and terrestrial applications. Undergraduate Dissertation. Massachusetts: Worcester Polytechnic Institute, 2017
- 30 O'Connor N J, Castaneda A J, Christidis P N, et al. Experimental study of flexible electrohydrodynamic conduction pumping for electronics cooling. *J Electron Packaging*, 2020, 142: 041105
- 31 Cacucciolo V, Shigemune H, Cianchetti M, et al. Conduction electrohydrodynamics with mobile electrodes: A novel actuation system for untethered robots. *Adv Sci*, 2017, 4: 1600495
- 32 Polygerinos P, Correll N, Morin S A, et al. Soft robotics: Review of fluid-driven intrinsically soft devices; manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction. *Adv Eng Mater*, 2017, 19: 1700016
- 33 Cacucciolo V, Shintake J, Kuwajima Y, et al. Stretchable pumps for soft machines. *Nature*, 2019, 572: 1–4
- 34 Chen X P, Cheng J S, Yin X Z. Research progress and application of electrohydrodynamics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 637–646 [陈效鹏, 程久生, 尹协振. 电流体动力学研究进展及其应用. 科学通报, 2003, 48: 637–646]
- 35 Huang W F, Li Y, Liu Q S. Application of lattice Boltzmann method to electrohydrodynamics: Droplet deformation and instability in uniform electric field (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2007, 52: 1232–1236 [黄伟峰, 李勇, 刘秋生. 格子Boltzmann方法在电流体动力学中的应用: 均匀电场中液滴的变形和失稳. 科学通报, 2007, 52: 1232–1236]
- 36 Wu Y, Li Y H. Progress and outlook of plasma flow control (in Chinese). *Asta Aeronaut Sin*, 2015, 36: 381–405 [吴云, 李应红. 等离子体流动控制研究进展与展望. 航空学报, 2015, 36: 381–405]
- 37 Wu J, Zhang M Q, Tian F B. Numerical analysis of three-dimensional electro-convection of dielectric liquids in a cubical cavity (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2018, 50: 184–195 [吴健, 张蒙齐, 田方宝. 三维方腔介电液体电对流的数值模拟研究. 力学学报, 2018, 50: 184–

- 195]
- 38 Liu M M, Chen X P, Xu X J. Experimental study on electrospray modes and steady spray characteristics with multiple metal capillaries (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2010, 42: 567–571 [刘明明, 陈效鹏, 徐晓建. 多毛细管电雾化喷洒模式及稳定喷洒特征研究. *力学学报*, 2010, 42: 567–571]
 - 39 Shen H, Yang Z L, Yu W X, et al. Numerical simulation of interaction of electrohydrodynamic secondary flow and charge particles in wire-plate electrostatic precipitators (in Chinese). *Proce CSEE*, 2019, 39: 1843–1850 [沈恒, 杨自力, 余婉璇, 等. 电除尘器内电流体动力学二次流与荷电粒子耦合作用的数值模拟. *中国电机工程学报*, 2019, 39: 1843–1850]
 - 40 Gao M, Zhang L S, Zhang D, et al. Experimental study on the enhancement of heat transfer under the action of electric field (in Chinese). *J Eng Thermal Energy Power*, 2020, 35: 120–126 [高明, 张凌霜, 张达, 等. 电场作用下电对流强化换热现象研究. *热能动力工程*, 2020, 35: 120–126]
 - 41 Atten P, Seyed-Yagoobi J. Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in poinwlane geometry—Theory. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99)*. Nara, 1999
 - 42 Seyed-Yagoobi J, Atten P, Bryan J E, et al. Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in pointplane geometry—experimental study. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99)*. Nara, 1999
 - 43 Daaboul M, Traoré P, Vázquez P, et al. Study of the transition from conduction to injection in an electrohydrodynamic flow in blade-plane geometry. *J Electrostatics*, 2017, 88: 71–75
 - 44 Louste C, Romat H, Traore P, et al. Electroconvective cavity flow patterns created by asymmetric electrode configuration. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2018, 54: 4851–4856
 - 45 Sun D X, Sun Z H, Song Z W, et al. Experimental study on the flow characteristics of electro-hydrodynamic plumes of dielectric liquid (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 983–996 [孙德鑫, 孙志浩, 宋志伟, 等. 介电液体电羽流流动特性实验研究. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50: 983–996]
 - 46 Sun D X, Sun Z H, Song Z W, et al. Experimental study on electrohydrodynamic flows of a dielectric liquid in a needle-plate configuration under direct/alternating current electric field. *J Electrostatics*, 2020, 106: 103454
 - 47 Sun Z, Yang P, Luo K, et al. Experimental investigation on the melting characteristics of n-octadecane with electric field inside macrocapsule. *Int J Heat Mass Transfer*, 2021, 173: 121238
 - 48 Jeong S I, Seyed-Yagoobi J, Atten P. Theoretical/numerical study of electrohydrodynamic pumping through conduction phenomenon. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2003, 39: 355–361
 - 49 Jeong S I, Seyed-Yagoobi J. Fluid circulation in an enclosure generated by electrohydrodynamic conduction phenomenon. *IEEE Trans Dielectrics Electrical Insulat*, 2004, 11: 899–910
 - 50 Yazdani M, Seyed-Yagoobi J. Effect of charge mobility on dielectric liquid flow driven by EHD conduction phenomenon. *J Electrostatics*, 2014, 72: 285–294
 - 51 Nishikawara M, Yanada H, Shomura K. Synergy between injection and dissociation mechanisms in electrohydrodynamic pumps modeled numerically. *J Electrostatics*, 2018, 93: 137–145
 - 52 Yazdani M, Yagoobi J S. The effect of uni/bipolar charge injection on EHD conduction pumping. *J Electrostatics*, 2015, 75: 43–48
 - 53 Suh Y K. Modeling and simulation of ion transport in dielectric liquids—Fundamentals and review. *IEEE Trans Dielectrics Electrical Insulat*, 2012, 19: 831–848
 - 54 Kim W, Ryu J C, Sun Y K, et al. Pumping of dielectric liquids using non-uniform-field induced electrohydrodynamic flow. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 364
 - 55 Wu J, Traoré P. A finite-volume method for electro-thermoconvective phenomena in a plane layer of dielectric liquid. *Numer Heat Transf Part A-Appl*, 2015, 68: 471–500
 - 56 Pearson M R, Seyed-Yagoobi J. Experimental study of EHD conduction pumping at the meso- and micro-scale. *J Electrostatics*, 2011, 69: 479–485
 - 57 Mahmoudi S R, Adamiak K, Peter Castle G S, et al. Study of electrohydrodynamic micropumping through conduction phenomenon. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2011, 47: 2224–2234
 - 58 Feng J, Wan Z, Feng C, et al. A performance-testing platform for a conduction micropump with an FR-4 copper-clad electrode plate. *JoVE*, 2017, 128: 55867

- 59 Vázquez P A, Talmor M, Seyed-Yagoobi J, et al. In-depth description of electrohydrodynamic conduction pumping of dielectric liquids: Physical model and regime analysis. *Phys Fluids*, 2019, 31: 113601
- 60 Castellanos A. *Electrohydrodynamics*. New York: Springer-Verlag Wien GmbH, 1998
- 61 Lei Y, Talmor M, Seyed-Yagoobi J. Effect of temperature on electrohydrodynamic conduction pumping performance. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Dielectric Liquids*. Bled, 2014
- 62 Nassar M, Vazquez P A, Chauris N, et al. Experimental models of the variation of HFE-7100 and HFE-7000 electric properties with temperature. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2020, 56: 4193–4199
- 63 Worraker W J, Richardson A T. A nonlinear electrohydrodynamic stability analysis of a thermally stabilized plane layer of dielectric liquid. *J Fluid Mech*, 1981, 109: 217–237
- 64 Siddiqui M A W, Seyed-Yagoobi J. Experimental study of pumping of liquid film with electric conduction phenomenon. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2009, 45: 3–9
- 65 Hanaoka R, Takahashi I, Takata S, et al. Properties of EHD pump with combination of rod-to-rod and meshy parallel plates electrode assemblies. *IEEE Trans Dielect Electr Insul*, 2009, 16: 440–447
- 66 Daaboul M, Traoré P, Modh S, et al. Influence of electrode spacing on a symmetrical washer-type electrohydrodynamic conduction pump. *J Phys-Conf Ser*, 2019, 1322: 012033
- 67 Modh S, Louste C, Traore P. Parametric study of an electrohydrodynamic conduction pump with washer-type geometry. In: *Proceedings of the 2016 Electrostatics Joint Conference*. West Lafayette, 2016
- 68 Patel V K, Seyed-Yagoobi J. Dielectric fluid flow generation in meso-tubes with micro-scale electrohydrodynamic conduction pumping. In: *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. Trondheim, 2011
- 69 Tobar N V, Christidis P N, Seyed-Yagoobi J, et al. Experimental study of flexible electrohydrodynamic conduction pumping for electronics cooling. In: *Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems*. San Francisco, 2018
- 70 O'Connor N J, Christidis P N, Tobar N V, et al. Experimental study of flexible electrohydrodynamic conduction pumping for electronics cooling. *J Electronic Packag*, 2020, 142: 041105
- 71 Feng Y S, Seyed-Yagoobi J. Control of liquid flow distribution utilizing EHD conduction pumping mechanism. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2006, 42: 369–377
- 72 Yang L, Talmor M, Shaw B C, et al. Flow distribution control in meso scale via electrohydrodynamic conduction pumping. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2015, 53: 1431–1438
- 73 Talmor M, Yang L, Larkin T R, et al. Flow distribution control in micro-scale via electrohydrodynamic conduction pumping. In: *Proceedings of 2016 Electrostatics Joint Conference*. West Lafayette, 2016
- 74 Yang L, Seyed-Yagoobi J. Liquid-phase flow distribution control in meso-scale with directionally reversed electrohydrodynamic conduction pumping configuration. In: *Proceedings of the 2017 Annual Meeting of the Electrostatics of America*. Ottawa, 2017
- 75 Yang L. Flow distribution control and thermal homogenization with EHD conduction pumping and experimental studies in pool boiling and internal condensation. Dissertation for Doctoral Degree. Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 2017
- 76 Hanaoka R, Takata S, Murakumo M, et al. Properties of liquid jet induced by electrohydrodynamic pumping in dielectric liquids. *Elect Eng Jpn*, 2002, 138: 1–9
- 77 Hanaoka R, Nakamichi H, Takata S, et al. Distinctive flow properties of liquid jet generated by EHD pump and conical nozzle. *Elect Eng Jpn*, 2006, 154: 9–19
- 78 Hemayatkhah M, Gharraei R, Esmaeilzadeh E. Flow pattern visualization of liquid film conduction pumping using flush mounted electrodes. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2011, 35: 933–938
- 79 Vasilkov S A, Chirkov V A, Stishkov Y K. Electrohydrodynamic flow caused by field-enhanced dissociation solely. *Phys Fluids*, 2017, 29: 063601
- 80 Chirkov V A, Vasilkov S A, Stishkov Y K. The role of field-enhanced dissociation in electrohydrodynamic flow formation in a highly non-uniform electric field. *J Electrostatics*, 2018, 93: 104–109
- 81 Daaboul M, Louste C, Romat H. PIV measurements on charged plumes-influence of SiO₂ seeding particles on the electrical behavior. *IEEE Trans Dielectrics Electrical Insulat*, 2009, 16: 335–342

- 82 Gouriou C, Traore P, Louste C. Influence of seeding particle type on velocity measurements in silicone oil under high voltage. *IEEE Trans Indust Appl*, 2017, 53: 2417–2476
- 83 Daaboul M, Louste C, Romat H. Transient velocity induced by electric injection in blade-plane geometry. *J Electrostatics*, 2009, 67: 359–364
- 84 Louste C, Traore P, Vazquez P A, et al. PIV flow measurements of conduction pumping flow created by nine pairs of asymmetric surface electrodes. In: *Proceedings of the 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. Roma, 2019
- 85 Perri A E, Sankaran A, Kashir B, et al. Electrically driven toroidal Moffatt vortices: Experimental observations. *J Fluid Mech*, 2020, 900: A12
- 86 Perri A E, Sankaran A, Staszal C, et al. The particle image velocimetry of vortical electrohydrodynamic flows of oil near a high-voltage electrode tip. *Exp Fluids*, 2021, 62: 1–3
- 87 Fuhr G, Hagedorn R, Muller T, et al. Microfabricated electrohydrodynamic (EHD) pumps for liquids of higher conductivity. *J Microelectromech Syst*, 1992, 1: 141–146
- 88 Darabi J, Rada M, Ohadi M, et al. Design, fabrication, and testing of an electrohydrodynamic ion-drag micropump. *J Microelectromech Syst*, 2002, 11: 684–690
- 89 Sato T, Yamanishi Y, Cacucciolo V, et al. Electrohydrodynamic conduction pump with asymmetrical electrode structures in the microchannels. *Chem Lett*, 2017, 46: 950–952
- 90 Masilamani K, Ganguly S, Feichtinger C, et al. Hybrid lattice-Boltzmann and finite-difference simulation of electroosmotic flow in a microchannel. *Fluid Dyn Res*, 2011, 43: 025501
- 91 Vázquez P A, Georgiou G E, Castellanos A. Numerical analysis of the stability of the electrohydrodynamic (EHD) electroconvection between two plates. *J Phys D Appl Phys*, 2008, 41: 175303
- 92 Wang B F, Wen-Hann Sheu T. Numerical investigation of electrohydrodynamic instability and bifurcation in a dielectric liquid subjected to unipolar injection. *Comput Fluids*, 2016, 136: 1–10
- 93 Adamiak K. Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: A review. *J Electrostatics*, 2013, 71: 673–680
- 94 Wu J, Traoré P, Louste C. An efficient finite volume method for electric field-space charge coupled problems. *J Electrostatics*, 2013, 71: 319–325
- 95 Traoré P, Wu J. On the limitation of Imposed Velocity Field strategy for Coulomb-driven electroconvection flow simulations. *J Fluid Mech*, 2013, 727: R3
- 96 Wu J, Traoré P. A finite-volume method for electro-thermoconvective phenomena in a plane layer of dielectric liquid. *Numer Heat Transfer Part A-Appl*, 2015, 68: 471–500
- 97 Traore P, Louste C, Seth U, et al. Numerical study of electrically induced flow by conduction mechanism in a blade-plane configuration. In: *Proceedings of the IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. Roma, 2019
- 98 Traore P, Louste C, Seth U, et al. Numerical investigation of EHD pumping through conduction phenomenon in a rectangular channel. In: *Proceedings of the 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. Roma, 2019
- 99 Selvakumar R D, Wu J, Huang J, et al. Electro-thermo-convection in a differentially heated square cavity under arbitrary unipolar injection of ions. *Int J Heat Fluid Flow*, 2021, 89: 108787
- 100 Selvakumar R D, Qiang L, Kang L, et al. Numerical modeling of solid-liquid phase change under the influence an external electric field. *Int J Multiphase Flow*, 2021, 136: 103550
- 101 Luo K, Wu J, Yi H L, et al. Lattice Boltzmann model for Coulomb-driven flows in dielectric liquids. *Phys Rev E*, 2016, 93: 023309
- 102 Luo K, Wu J, Yi H L, et al. Lattice Boltzmann modelling of electro-thermo-convection in a planar layer of dielectric liquid subjected to unipolar injection and thermal gradient. *Int J Heat Mass Transfer*, 2016, 103: 832–846
- 103 Luo K, Wu J, Yi H L, et al. Three-dimensional finite amplitude electroconvection in dielectric liquids. *Phys Fluids*, 2018, 30: 023602
- 104 Hu Y, D Li, Niu X, et al. Lattice Boltzmann model for the axisymmetric electro-thermo-convection. *Comput Mathemat Appl*, 2019, 78: 55–65
- 105 Hu Y, Li D, Niu X, et al. An immersed boundary-lattice Boltzmann method for electro-thermo-convection in complex geometries. *Int J Thermal Sci*, 2019, 140: 280–297
- 106 Guan Y, Novosselov I. Two relaxation time lattice Boltzmann method coupled to fast fourier transform poisson solver: Application to electroconvective flow. *J Comput Phys*, 2019, 397: 108830
- 107 Zhu B, Guan Y, Wu J. Two-relaxation time lattice Boltzmann models for the ion transport equation in electrohydrodynamic flow: D2Q5 vs D2Q9 and D3Q7 vs D3Q27. *Phys Fluids*, 2021, 33: 044108

- 108 Wang Y, Qin G, He W, et al. Spectral element method for numerical simulation of ETHD enhanced heat transfer in an enclosure with uniform and sinusoidal temperature boundary conditions. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 141: 949–963
- 109 Su Z G, Li T F, Yi H L. Simulation of electroconvection in a dielectric liquid by DUGKS. *Comput Fluids*, 2019, 188: 31–43
- 110 Pan M, He D, Pan K. Energy stable finite element method for an electrohydrodynamic model with variable density. *J Comput Phys*, 2021, 424: 109870
- 111 Pan M, He D, Pan K. Unconditionally energy stable schemes for an electrohydrodynamic model of charge transport in dielectric liquids. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2020, 361: 112817
- 112 Wang L, Wei Z, Li T, et al. A lattice Boltzmann modelling of electrohydrodynamic conduction phenomenon in dielectric liquids. *Appl Math Model*, 2021, 95: 361–378
- 113 Yazdani M, Seyed-Yagoobi J. The effect of charge injection on EHD conduction pumping. In: Proceedings of the Industry Applications Society Meeting. Houston: IEEE, 2010
- 114 Vasilkov S A, Chirkov V A, Stishkov Y K. Study on high-voltage conductivity provided solely by field-enhanced dissociation in liquid dielectrics. *J Electrostatics*, 2017, 88: 81–87
- 115 Vasilkov S A, Poluektova K D, Stishkov Y K. Experimental and numerical study of an electrohydrodynamic pump operating due to the field-enhanced dissociation near a dielectric barrier. *Phys Fluids*, 2020, 32: 107102
- 116 Fernandes D, Cho D, Suh Y. Electrohydrodynamic flow of dielectric liquid around a wire electrode-effect of truncation of onsager function. *IEEE Trans Dielectrics Electrical Insulat*, 2014, 21: 194–200
- 117 Fernandes D V, Suh Y K. Numerical simulation and design optimization of an electrohydrodynamic pump for dielectric liquids. *Int J Heat Fluid Flow*, 2016, 57: 1–10
- 118 Talmor M, Seyed-Yagoobi J. Numerical study of micro-scale EHD conduction pumping: The effect of pump orientation and flow inertia on heterocharge layer morphology and flow distribution control. *J Electrostatics*, 2021, 111: 103548
- 119 Yazdani M, Seyed-Yagoobi J. Electrically induced dielectric liquid film flow based on electric conduction phenomenon. *IEEE Trans Dielect Electr Insul*, 2009, 16: 768–777
- 120 Gharraei R, Esmailzadeh E, Heirani Nobari M R. Numerical investigation of conduction pumping of dielectric liquid film using flush-mounted electrodes. *Theor Comput Fluid Dyn*, 2013, 28: 89–106
- 121 Yazdani M, Seyed-Yagoobi J. Numerical investigation of electrohydrodynamic-conduction pumping of liquid film in the presence of evaporation. *J Heat Transfer*, 2009, 131: 135–335
- 122 Talmor M, Louste C, Seyed-Yagoobi J. PIV Flow field measurements of electrohydrodynamic conduction pumping. In: Proceedings of the Electrostatics Joint Conference. Boston, 2018
- 123 Liu Q, Wu J. Numerical simulation algorithm for gas-liquid two-phase electrohydrodynamics problems based on VOF method (in Chinese). In: Proceedings of the 19th Chinese Computational Fluid Dynamics Conference. Nanjing, 2021 [刘强, 吴健. 基于VOF方法的气-液两相电流体动力学数值算法研究. 见: 第十九届全国计算流体力学会议. 南京, 2021]
- 124 Feng Y, Seyed-Yagoobi J. Control of adiabatic two-phase dielectric fluid flow distribution with EHD conduction pumping. *J Electrostatics*, 2006, 64: 621–627
- 125 Jeong S I, Didion J. Performance characteristics of electrohydrodynamic conduction pump in two-phase loops. *J Thermophysics Heat Transfer*, 2008, 22: 90–97
- 126 Yang L, Talmor M, Seyed-Yagoobi J. Flow distribution control between two parallel meso-scale evaporators with electrohydrodynamic conduction pumping. In: Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Phoenix, 2016
- 127 Yazdani M, Seyed-Yagoobi J. Fluid circulation within a spherical reservoir with ehd conduction pumping. In: Proceedings of the Industry Applications Conference. New Orleans: IEEE, 2007
- 128 Yazdani M, Seyed-Yagoobi J. Enhancement of external conduction heat transfer by pumping of liquid condensate circumferentially with electric conduction phenomenon. In: Proceedings of the 2007 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Seattle, 2007
- 129 Yazdani M, Seyed-Yagoobi J. An electrically driven impinging liquid jet for direct cooling of heated surfaces. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2010, 46: 650–658
- 130 Yazdani M, Seyed-Yagoobi J. Heat transfer enhancement of a Poiseuille flow by means of electric conduction phenomenon. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Chasseneuil: IEEE, 2008

- 131 Yazdani M, Yagoobi J S. Heat transfer enhancement of backstep flow by means of EHD conduction pumping. *Int J Heat Mass Transfer*, 2014, 73: 819–825
- 132 Nourdanesh N, Esmaeilzadeh E. Experimental study of heat transfer enhancement in electrohydrodynamic conduction pumping of liquid film using flush electrodes. *Appl Thermal Eng*, 2013, 50: 327–333
- 133 Nourdanesh N, Hossainpour S, Esmaeilzadeh E. Experimental investigation of heat transfer enhancement in an open-channel flow with dielectric fluid using electrohydrodynamic conduction pumps concept. *Appl Thermal Eng*, 2019, 157: 113711
- 134 Mirzaei M, Saffar-Avval M. Enhancement of convection heat transfer using EHD conduction method. *Experiment Thermal Fluid Sci*, 2018, 93: 108–118
- 135 Mirzaei M, Saffar-Avval M, Vahidic B, et al. Theoretical and experimental modeling of EHD conduction in porous conductive material inside a tube. *J Electrostat*, 2019, 97: 15–25
- 136 Patel V K, Robinson F, Seyed-Yagoobi J, et al. Terrestrial and microgravity experimental study of microscale heat-transport device driven by electrohydrodynamic conduction pumping. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2013, 49: 2397–2401
- 137 Patel V K, Seyed-Yagoobi J. A mesoscale electrohydrodynamic-driven two-phase flow heat transport device in circular geometry and in-tube boiling heat transfer coefficient under low mass flux. *J Heat Transfer*, 2015, 137: 041504
- 138 Patel V K, Seyed-Yagoobi J, Robinson F, et al. Effect of gravity on electrohydrodynamic conduction driven liquid film flow boiling. *J Thermophysics Heat Transfer*, 2016, 30: 429–437
- 139 Kano I, Nishina T. Effect of electrode arrangements on EHD conduction pumping. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2013, 49: 679–684
- 140 Kano I, Takahashi Y. Effect of electric field generated by micro-sized electrode on pool boiling. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2013, 49: 2382–2387
- 141 Ahangar Zonouzi S, Aminfar H, Mohammadpourfard M. A review on effects of magnetic fields and electric fields on boiling heat transfer and CHF. *Appl Thermal Eng*, 2019, 151: 11–25
- 142 Pearson M R, Seyed-Yagoobi J. EHD conduction-driven enhancement of critical heat flux in pool boiling. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2013, 49: 1808–1816
- 143 Pearson M R, Seyed-Yagoobi J. Experimental study of linear and radial two-phase heat transport devices driven by electrohydrodynamic conduction pumping. *J Heat Transfer*, 2015, 137: 022901
- 144 Patel V K, Seyed-Yagoobi J. Combined dielectrophoretic and electrohydrodynamic conduction pumping for enhancement of liquid film flow boiling. *J Heat Transfer*, 2017, 139: 061502
- 145 Yu H, Zhang Q, Qiao D Y, et al. Comparison of different processes in making EHD micropump electrode (in Chinese). *Opt Prec Eng*, 2009, 17: 1635–1639 [于翮, 张强, 乔大勇, 等. 电液动力微泵微电极的不同制作工艺的比较. *光学精密工程*, 2009, 17: 1635–1639]
- 146 Yu H, Zhang Q, Yu J, et al. Experimental analysis on electrohydrodynamic micropump (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2009, 30: 857–859 [于翮, 张强, 俞坚, 等. 电液动力微泵的实验分析. *工程热物理学报*, 2009, 30: 857–859]
- 147 Yu H, Yu J, Ma C F. The development of electrohydrodynamic micropump (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2011, 32: 1215–1217 [于翮, 俞坚, 马重芳. 电液动力微泵的改进. *工程热物理学报*, 2011, 32: 1215–1217]
- 148 Li S M, Li Q Q, Wang B H, et al. Experimental study on the static thrust of liquid EHD pump with single needle-ring and needle-mesh electrodes (in Chinese). *High Vol Eng*, 2015, 41: 2108–2115 [李斯盟, 李清泉, 王宝华, 等. 针-环与针-网电极液体EHD泵静态驱动力的实验研究. *高电压技术*, 2015, 41: 2108–2115]

Overview of electrohydrodynamic conduction pumping

DU ZhongLin, WU Jian, HUANG JunYu & WANG Qi

Key Laboratory of Aerospace Thermophysics, School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

This article describes an emerging fluid-flow generation and control technology, namely, electrohydrodynamic (EHD) conduction pumping. This pump is a nonmechanical-type pump based on the direct interaction of electric field and dielectric liquid. The driving force of the pump is the Coulomb force, and its free charge comes from the dissociation process of impurities or weak electrolytes in the liquid. In addition to the inherent advantages of EHD conduction pumps (such as intelligent active control via an electric field, absence of mechanical moving parts, simple design, light weight, suitability for special environments such as low-gravity spaces, and low energy consumption), EHD conduction pumps provide stable performance, long working life, and other unique advantages. In addition to traditional applications such as flow control, heat-transfer enhancement, and enhanced mixing, these conduction pumps have found a variety of innovative applications in the fields of micro-robot drive, wearable devices, and other fields in recent years. Currently, conduction-pump technology in the international community has gradually developed from macro-scale single-phase fluid to micro-scale multi-phase flows and has started to be tested in a low-gravity environment in orbit, which is expected for application in future spacecraft space-thermal management and other fields. However, research on electrohydrodynamics in China has started late, and studies on conductance-pump technology have been lacking. Therefore, this review introduces the EHD conduction-pump technology in detail from the aspects of its working principle, theoretical model, mathematical equations, research status, and recent progress, as well as in terms of future perspectives.

electrohydrodynamics, conduction pumping, dielectric fluid, Coulomb force, cooling system

doi: [10.1360/SST-2021-0298](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0298)