doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2022.09.011

镓基室温液态金属复合电场运动特性^①

张利②陈强李研彪③

(浙江工业大学机械工程学院 杭州 310032)

摘 要 镓基室温液态金属作为一种新兴的功能材料在各个领域引起了广泛的关注。利 用电场驱动液态金属运动是一种简便方法,但目前对于复合电场作用下液态金属的运动 特性研究较少。本文基于表面张力与电双层理论建立了液态金属驱动力模型;通过实验 得到了不同液态金属颗粒大小、电极距离、电解液浓度下的阈值电压及一定范围内四者的 线性回归模型;开展了水平和竖直自由空间的复杂电场作用下液态金属颗粒运动仿真和 实验研究。结果表明,在一定范围内阈值电压与颗粒大小和电解液浓度成负相关,与电极 距离成正相关,液态金属在复合电场中的运动轨迹与电场分布有关,通过电场的布置可实 现对液态金属运动轨迹和速度的控制。

关键词 镓基液态金属;复合电场;运动控制;表面张力;阈值电压

0 引言

稼、钢、锡、锌等单质经特殊处理混合而成的镓 基室温液态金属合金作为一种新兴的多功能材料, 因其低粘度、高表面张力、可控的流动性、无毒性等 优良性质^[1-2]引起了广泛的关注。目前在微流控系 统^[34]、软体机器人^[56]、生物医学^[78]等领域展开了 对其理论和应用研究。

电场和磁场可实现液态金属的驱动控制^[9]。 在利用磁场进行驱动时,需要将液态金属与磁性颗 粒混合制成有磁性的液态金属^[10-11],该方式虽然可 以驱动液态金属运动,但是磁性颗粒的混入破坏了 液态金属原有的流动性^[12]。电场驱动液态金属运 动的方式由于具有结构简单、成本低、工作电压低、 可控性强等^[13-14]优点已成为目前研究热点。文献[15] 将液态金属放置在不同形状的有机玻璃槽内,通过 在槽两端施加电压驱动液态金属克服尖角和小间隙 做"蠕虫运动",并研究了不同电压下液态金属颗粒 的运动速度。此外,文献[16]将液态金属颗粒与密

度较低的固体材料结合制成了液态金属小车的车 轮,该车轮因漂浮在水平轨道槽上而减少了摩擦接 触,在轨道槽两端电压的的作用下带动小车运动,同 时研究了颗粒大小对于小车运动速度的影响。文 献[17]研究了在交流电作用下液态金属的运动情 况,实验表明在交流电作用下液态金属会产生振荡 现象,液态金属的直径、电极电压的大小和频率、电 解质的浓度均会影响振荡效果,且在特定的实验参 数下液态金属会发生共振。此外,国内外研究者还 利用液态金属的电场驱动特性,制成了微动开 关^[18]、微型透镜^[19]等装置。但是,现有的电场控制 液态金属运动的研究多集中在特定形状的水平通道 内且电极布置单一,尚未对多电极布置下的水平和 竖直三维空间复杂电场下的运动控制进行研究,且 对液态金属在电场下运动的驱动力模型的研究还不 够完善。

本文基于表面张力和电双层理论建立了完整的 液态金属驱动力模型。通过实验得到了不同实验条 件下液态金属的阈值电压,建立了一定范围内驱动

① 国家自然科学基金(51575493)和浙江省基础公益研究计划(LGG19E050025)资助项目。

② 女,1971 年生,博士,教授;研究方向:超精密加工技术和机电控制及自动化技术;E-mail: zhangli@ zjut. edu. cn。

③ 通信作者, E-mail: lybrory@zjut.edu.cn。 (收稿日期:2021-03-04)

阈值电压、颗粒大小、溶液浓度、电极距离之间的阈 值电压模型。对水平和竖直空间的复杂电场下的液 态金属运动控制进行了研究,得到了运动轨迹与电 场分布的关系,为复杂电场下液态金属的运动控制 提供了指导。

1 电驱动机理及驱动力计算

1.1 液态金属在电场下运动原理

在碱性溶液中,稼基液态金属的主要成分稼与 溶液缓慢反应,生成稼酸盐[Ga(OH)₄]⁻,在无外部 电场作用下,这些阴离子均匀分布在液态金属表面。 同时,阳离子在附近堆积,使得液态金属与 NaOH 溶 液界面形成一个类似带电电容器的扩散电双层 (electric double layer,EDL),如图1(a)所示。此时 电荷的均匀分布,使得液态金属液滴边界的表面张 力对称。当施加驱动电压后,在正负极之间的电解 质中产生了电位梯度,使得电双层两端的电位差发 生变化,液态金属表面的电荷重新分布。电荷的不 均匀分布影响了液滴的表面张力,液态金属的表面 张力和电势的关系可用 Lippmann 方程^[20]表示。



(a)不加任何电场下的液态金属



图1 液态金属在电场下的运动机理

$$\gamma = \gamma_0 - \frac{c}{2}V^2 \tag{1}$$

式中,*c* 为电双层的电容,*V* 为电极电压, γ₀ 为当电 压 *V*=0 时,金属液滴的最大表面张力。由于界面 张力随着电压的增加而减小,因此靠近阴极端的表 面张力大于阳极端,当由两端表面张力差引起的表 面张力驱动力大于粘滞阻力和摩擦力时,液态金属 液滴迅速启动并向正电极端运动,如图 1(b)所示。

1.2 液态金属驱动力计算

为便于分析,将液态金属在整个运动过程中假 定为球形来分析其驱动力。EDL 与半球之间的压 力差可以通过 Young-Laplace 方程^[21]表示。

$$p_i = \gamma \frac{2}{r} \tag{2}$$

式中, *p_i* 为表面压力差, *γ* 为表面张力, *r* 为曲率半径。液态金属颗粒与基板底部和基板壁之间的电阻 *R_{IM}* 可表示为

$$R_{LM} = \int_{-r}^{r} \frac{\sigma}{dh - \pi (r^2 - x^2)} dx$$
$$= \frac{2\sigma}{\pi \sqrt{\frac{dh}{\pi} - r^2}} \tan^{-1} \frac{r}{\sqrt{\frac{dh}{\pi} - r^2}}$$
(3)

式中,d、h分别表示槽宽度和溶液高度, σ 为电解液的电阻率。流经上述 R_{LM} 的电流所产生的电位降 Δu 可表示为

$$\Delta u = \frac{(V_{\rm in} - V_{\rm Electrolysis})R_{LM}}{R_{\rm total}}$$
(4)

式中, V_{in}和 V_{Electrolysis}分别表示输入电压和由电解所 产生的电位降, R_{total}为两电极之间的等效电阻。因 此,液态金属颗粒左半球和右半球中的 EDL 电压可 表示为

$$V_L = V - \frac{\Delta u}{2} \tag{5}$$

$$V_R = V + \frac{\Delta u}{2} \tag{6}$$

因此,根据式(1)可知,液态金属颗粒左右两边 的表面张力差 $\Delta \gamma$ 可表示为

$$\Delta \gamma = \gamma_L - \gamma_R = \frac{c}{2} (V_R^2 - V_L^2)$$
$$= cV\Delta u = q_0\Delta u \tag{7}$$

式中, c和 q₀为 EDL 初始表面单位面积电容和电荷 密度。根据式(2)和式(7),液态金属颗粒左右半球

所产生的表面压力差 Δp 可表示为

$$\Delta p = p_L - p_R = \Delta \gamma \frac{2}{r} = \frac{2q_0 \Delta u}{r}$$
(8)

综合式(3) ~式(8) 液态金属颗粒的表面张力 驱动力 *F_E* 可表示为

$$F_{E} = \Delta p \pi r^{2} = \frac{4\sigma q_{0} (V_{\rm in} - V_{\rm Electrolysis})r}{R_{\rm total} \sqrt{\frac{dh}{\pi} - r^{2}}} \cdot \tan^{-1} \frac{r}{\sqrt{\frac{dh}{\pi} - r^{2}}}$$
(9)

如图 1(b) 所示,处于基板上的液态金属颗粒水 平方向上除受到表面张力驱动力外,还受到粘滞阻 力和摩擦力的作用,其总驱动力 *F*_{st} 可表示为

$$F_{st} = F_E + F_v + F_f \tag{10}$$

式中, F_v表示粘滞阻力, 可表示为

$$F_v = \frac{1}{2} C \rho \pi r^2 v^2 \tag{11}$$

$$C = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4$$
(12)

$$Re = \frac{2\rho vr}{u} \tag{13}$$

式中, *ρ* 为溶液的密度, *v* 为液态金属小球的速度, *C* 为无量纲阻力系数, *Re* 为流体的雷诺数, *u* 为溶液的粘度。

F_f为摩擦力,可表示为

$$F_f = -\frac{4}{3}\pi r^3 \mu \rho' g \tag{14}$$

式中, μ 为液态金属小球与基底的动摩擦因数, ρ' 为液态金属和电解液之间的密度差。故式(10)可 表示为

$$F_{st} = -\frac{1}{2}C\rho\pi r^{2}v^{2} - \frac{4}{3}\pi r^{3}\mu\rho'g + \frac{4\sigma q_{0}(V_{in} - V_{\text{Electrolysis}})r}{R_{\text{total}}\sqrt{\frac{dh}{\pi} - r^{2}}}\tan^{-1}\frac{r}{\sqrt{\frac{dh}{\pi} - r^{2}}}$$
(15)

由式(15)可知,液态金属的总驱动力与其初始 表面电荷密度、半径、溶液的电阻率、溶液横截面积 及所施加的电极电压、两电极间的等效电阻有关。 由于电解液的浓度会影响液态金属初始表面电荷密 度和溶液的电阻率,而当电解液浓度和横截面积一 定时,两电极间的电阻率与电极距离成正比。因此, - 982 - 总驱动力与电解液浓度、电极电压呈正相关,与电极 距离呈负相关。当液态金属半径较小时,半径越大, 驱动力越大,但随着半径逐渐增大,粘滞阻力和摩擦 力增大,使得总驱动力变小。

2 建立阈值电压模型

由液态金属的驱动力模型可知,在颗粒大小、电 解液浓度、电极距离一定的情况下,施加电压的大小 决定了液态金属的运动状态。为实现液态金属在电 场下的运动控制,需要确定液态金属运动的阈值电 压,因此需要进行阈值电压测量实验并运用线性回 归分析建立阈值电压模型。

2.1 阈值电压测量

在研究液态金属运动的阈值电压前首先利用滴 定装置得到8种颗粒大小不同的液态金属颗粒用于 阈值电压及后续运动控制实验,其体积对应的直径 如表1所示。

表1 液态金属颗粒体积及对应直径

编号	液滴体积/μL	液滴直径/mm
1	14.44	2.86
2	28.88	3.84
3	43.32	4.28
4	57.76	4.72
5	72.20	5.51
6	86.64	5.83
7	101.08	6.47
8	115.52	6.98

阈值电压测量实验装置如图 2 所示,在本文中 NaOH 溶液浓度为 0.1~0.5 mol/L,电极距离为 2 cm、4 cm、6 cm、8 cm,液态金属为表 1 中的 8 种颗 粒。开始实验时,液态金属颗粒静止在正负电极中 点,当接通电源后,液态金属颗粒需要克服粘滞阻力 和底部基板的摩擦力运动。为避免外部环境及实验 误差,以运动电极距离的 1/4 时的电压作为该情况 下的阈值电压。在实际测量中,阈值电压的范围波 动很大,为避免极值对实验数据的影响,每个阈值电 压都要进行 5 次测量,并去除最高和最低值,选择测 量的阈值电压的平均值作为结果。此外,每实验 10 次更换溶液以减小电解对溶液浓度产生影响,每次 所加的溶液高度保持相同,即溶液在槽内的横截面 积相同。

图 3 所示为根据实验结果绘制的曲线图,从图 中可以看出,阈值电压与液态金属颗粒大小和溶液 浓度呈负相关,与电极间距呈正相关。以图 3(a)为 例,当电极距离为 2 cm,溶液浓度为 0.1 M,颗粒直 径为 2.86 mm 的液态金属的阈值电压为 9.21 V,而 其余条件相同,颗粒直径 *d* = 6.98 mm 的阈值电压 下降为 5.73 V,其余浓度和电极距离相同,颗粒大 小不同的液态金属的阈值电压也同样呈下降趋势; 当液态金属颗粒大小和电极距离相同时,如图 3(a) 中的直径为 2.86 mm 的液态金属,其在浓度为 0.1 M



图 2 驱动阈值电压实验



图 3 不同颗粒大小、浓度、电极间距离的液态金属的阈值电压

的溶液中的阈值电压为 9.21 V,但在溶液浓度为 0.5 M的溶液中的阈值电压下降为 7.23 V;对比图 中不同电极距离下的阈值电压结果可知,当溶液浓度、颗粒直径相同时,电极距离与阈值电压成正比, 如当电极距离为 2 cm,溶液浓度为 0.1 M 时,直径为 2.86 mm 的液态金属的阈值电压为 9.21 V,但是当电极距离为 8 cm 时,其阈值电压增加为 29.36 V。此 外,当颗粒直径小于 4.72 mm 时,阈值电压受颗粒大小影响较大,但当颗粒直径大于 4.72 mm 时,阈值 电压与颗粒直径虽仍呈负相关,但影响逐渐变小。 上述现象可由式(15)解释,由于实验时保证了横截 面积 S 相同,因此当驱动颗粒大小相同的液态金属 时,需要的总驱动力相同,由于总驱动力与电解液浓 度、电极电压呈正相关,与电极距离呈负相关,故当 减小电极距离或增加溶液浓度时所需的阈值电压减 小。而当液态金属颗粒的直径逐渐增加时,其受到 的粘滞阻力和与基板的摩擦力也逐渐增加,导致当 颗粒直径大于4.72 mm 时,阈值电压的减幅降低。

2.2 阈值电压线性回归模型

为探究阈值电压与电极距离、颗粒直径和溶液 浓度的关系,将上述阈值电压测量实验得到的 160 组实验数据,利用 SPSS Statistics 软件进行线性回归 分析,定量化评价各参数之间的相互影响并建立四 者的预测模型。以阈值电压 V 为因变量,电极距离 ε 、颗粒直径 d 和溶液浓度 φ 为自变量,得到表 2所 示的线性回归分析结果。

非标准化系数		_	DW	D ²	F	
	В	标准差	- p	D-W	ĸ	Г
常数	17.136	0.847	0.000 **			
浓度	-11.496	1.183	0.000 **	1 175	0 922	F(3, 156) = 260.063
电极距离	1.497	0.075	0.000 **	1.1/5	0.855	p = 0.000
颗粒半径	-2.173	0.129	0.000 **			

表 2 线性回归分析结果(n=160)

注: * p < 0.05 ** p < 0.01

*R*² 是回归分析的拟合优度,反映了自变量对因 变量的解释程度,其值在 0~1之间,且数值越大意 味着拟合程度越高。从表 2 可以看出,模型 *R*² 为 0.833,意味着浓度、电极距离、颗粒直径可以解释阈 值电压的 83.3% 变化原因。对模型进行 *F* 检验发现 模型通过 *F* 检验(*F* = 260.063,*p* = 0.000 < 0.05), 也即说明浓度、电极距离、颗粒直径中至少一项会对 阈值电压产生影响关系。

B值为线性回归非标准化系数,该值在 p 值小 于 0.05 时有效。从表 2 可知,浓度的回归系数为 -11.496,电极距离的回归系数为 0.15,颗粒半径 的回归系数为 -2.173,它们的 p 值都小于 0.01,意 味着浓度和颗粒半径会对阈值电压产生显著的负影 响,而电极距离会对阈值电压产生显著正影响。由 于线性回归的常数为 17.136,故阈值电压的线性回 归模型公式为 $V = 17.136 - 11.496\varphi + 1.497\varepsilon - 2.173d$ (16)

式中,V为阈值电压, φ 为电解液浓度, ε 为电极距离,d为液态金属直径。本实验中电解液浓度、电极距离、液态金属直径的选取范围分别为0.1M $\leq \varphi \leq$ 0.5M、2 cm $\leq \varepsilon \leq 8$ cm、2.86 mm $\leq d \leq 6.98$ mm。从该范围中任取8组实验条件进行阈值电压测量,得到了真实阈值电压、预测阈值电压及二者的相对误差如表3所示。由表3可知,阈值电压和预测阈值电压的相对误差在3.46%~10.17%之间,计算其相对误差均值为7.33%,故可知该阈值电压模型在本实验范围内具有较好的普适性。

为了验证模型的合理性,需要对模型的残差进 行检验。图4所示为模型标准化残差图,从图中可 看出残差符合正态分布假设。由表2可知,模型的 残差自相关检验(D-W)为1.175,说明模型残差存在 很弱的相关性。因此可认为该回归模型具有合理性。

衣 5 具头阈值电压与顶侧阈值电压间的相对误差						
取值参数			☆测由压/W	新测由 圧 /V	相对语学/0	
φ/M	ε/cm	d/mm	关例电压/ \	顶侧电压/ 1	相对厌乏/70	
0.1	7.0	3.53	20.80	18.795	9.64	
0.2	2.5	3.53	9.80	10.910	10.17	
0.2	3.0	4.55	8.70	9.442	7.85	
0.3	3.0	4.55	7.80	8.293	5.94	
0.3	5.0	5.32	9.28	9.613	3.46	
0.4	5.0	5.32	8.15	8.464	3.66	
0.4	7.0	6.21	8.70	9.524	8.65	
0.5	7.0	6.21	7.60	8.374	9.24	

立河住市厅上在测河住市厅间的扫井22 关



3 仿真及实验分析

3.1 水平空间运动仿真及实验

为验证液态金属在多电极电场作用下运动控制 的可行性,首先对其在水平槽内的运动进行研究。 通过水平槽两侧电场的布置,实现对液态金属运动 的控制,其实验示意图如图5所示,其中液态金属颗 粒取编号为3的颗粒(即直径为4.28 mm),NaOH 溶液浓度为0.5 M,水平槽尺寸为100 mm ×70 mm ×10 mm。需要注意的是,由于仿真时将模型进行 了二维简化,液态金属颗粒在运动过程中仅受到表 面张力作用而忽略运动过程中摩擦力、粘滞阻力等 对液态金属颗粒运动的影响,故施加的电压比实际 实验所需电压要小得多,仿真实验仅研究了电场对 表面张力的影响,实验和仿真中电极电压设置如表4 所示。

为使得仿真与实际情况尽可能保持一致,在仿



真阶段需选择合适的物理场模型并为所选的物理场 模型设定边界条件。根据实验特性,选择电流和层 流物理场,引入动网格组件追踪液态金属和电解液 的界面运动,根据式(1)设定液态金属与溶液的表 面张力系数。液态金属和电解液的材料特性与该仿 真有直接的影响,其关键值设定如表5所示。

由招	电日	电压/V	
电极	仿真	实验	
1	0	0	
2	0	0	
3	10	13	
4	10	13	
5	0	0	
6	5	8	

表4 7	k平空间运动电场布置
------	------------

表 5 数值模拟参数

仕古 矣粉	数	值
10 具参数	液态金属颗粒	电解质溶液
密度/kg・m ⁻³	6400	1000
动力粘度/Pa・s	0.37	1.01e-3
电导率/(S/m)	1 e4	9.7
相对介电常数	7.08e-10	8.85e-11

图 6(a) 所示为仿真所用的模型, 图 6(b) 为该 模型下的电势分布图。图 7 为液态金属颗粒在电场 中运动的界面追踪图像,其中球形代表液态金属颗 粒,箭头方向为电场的方向,其大小及颜色代表电场 大小。从图中可以看出,液态金属先向电极 6 靠近, 后又向电极 3 偏移。结合图 6(b) 和图 7 可知,液态 金属颗粒的运动与电场的分布有着密切的关系,其 总是向着电场强度增大的方向运动,运动的方向恰 与电场方向相反,即沿着电势高处运动。





图 7 电场强度及颗粒运动轨迹仿真

图 8 为液态金属液滴水平运动控制实验中颗粒 运动情况,图 9 为水平运动控制的仿真和实验轨迹 对比图。从图中可以看出,实验中液态金属液滴的 运动轨迹与仿真结果基本一致,验证了仿真模型的 有效性。从图 8 可以看出,在电极 6 附近,由于液态 金属颗粒同时受到电极 3 和电极 6 的作用,液态金 属在这两电极的作用下由小球形状变成椭球形,由 于电极 3 施加的电势大于电势 6,故液态金属颗粒 逐渐靠近电极 3 并恢复圆球形状。



图 8 液态金属液滴水平运动控制情况



4.2 竖直自由空间运动仿真及实验

上文对液态金属颗粒在水平空间的运动进行了 探究,本节将对液态金属颗粒在自由空间的运动控 制进行研究,实验原理图如图 10 所示。使用针头将 编号为1 和4 的液态金属颗粒(直径分别为2.86 mm 和4.72 mm)从针筒中挤出,尺寸为60 mm 10 mm 150 mm 的 PMMA 槽内充满了浓度为0.2 M 的氢氧



图 10 液态金属液滴竖直空间电场控制实验示意图

组别	颗粒直径	电极电压/V				
	/mm	电极1	电极 2	电极 3	电极 4	
А	2.86	10	10	0	0	
В		18	18	0	0	
С		15	0	0	20	
D		15	0	0	15	
Е	4.72	8	8	0	0	
F		14	14	0	0	
G		10	0	0	20	
Н		15	0	0	15	

表6 各组电场布置

由上文水平空间运动控制实验可知,液态金属 颗粒的运动与所施加电场有着密切关系,故在该实 验前对各组电场分布进行了仿真,其结果如图11所 示,图中箭头指向代表电场方向,图例代表电场强 度。

图 12 和图 13 分别为2.86 mm 和4.72 mm 的液 态金属颗粒在不同的电场分布下不同时刻的运动叠 加图。图中每两滴液滴的时间间隔为0.03 s,方格 纸每一小格的距离为5 mm,结合图 11 的电场分布 情况可以看出,液态金属颗粒的运动情况与上文水 平空间的运动相似,都和电场的分布有密切关系。





图 12 2.86 mm 直径的液态金属液滴运动叠加图



为更直观地观察对比各组别下液态金属颗粒的 运动轨迹,绘制了图14所示的液态金属颗粒的运动 轨迹曲线。由式(16)可知,电解液浓度为0.2 M,电 极距离为5 cm,颗粒直径为2.86 mm时,液态金属 颗粒在水平空间上的阈值电压为 16.107 V; 当颗粒 的直径为 4.72 mm 时,其阈值电压为 12.066 V。分 析图 12(a)和图 13(a)可知,由于颗粒直径远小于 竖直槽的宽度,故相较于水平槽运动实验,其不受摩 擦力的作用,且上文液态金属阈值电压实验所得的 结果为以运动电极距离 1/4 时的电压作为阈值电 压。故当施加电压为10V时,直径为2.86mm液态 金属颗粒在下落过程中,向左侧略微偏移了0.35 cm; 施加电压为8V,直径为4.72 mm 的液态金属颗粒 水平偏移量为1 cm。当施加的电压大于上述阈值 电压时,如图 12(b)和图 13(b)所示,当电极电压达 到 18 V 时, 2.86 mm 的液态金属颗粒在水平方向产 生明显偏移,在下落4.5 cm 后便与壁面相碰(即水 平位移 2.5 cm), 而直径为 4.72 mm 的液态金属颗 粒在14V电场下,下落6.7 cm 后与左壁面相碰。



当施加的电压为组 C 和组 G 的复杂电场时,由 于前半段电场的方向由左侧指向右侧,故在刚下落 过程中颗粒先向左侧偏移,后半段电场方向与前半 段相反,且电场的强度较前半段大,故在竖直槽的后 半段颗粒迅速向右侧运动,且最终都落在释放点的 右侧。组 D 和组 H 为施加相同电场时,颗粒的运动 轨迹,颗粒较大的H组在下落时先与壁面相碰,后 — <u>988</u> —

在反弹力水平分力和后半段电场力的作用下向相反 方向运动,而颗粒较小的 D 组在整个下落过程中都 未与壁面相碰。产生该现象的主要原因是由于较大 的颗粒使得其在下落过程中的惯性较大,需要更大 的表面张力。此外,从图中 D 组轨迹和图 11(g)可 知,当颗粒运动到竖直方向的电场过渡段后才开始 有序地从右侧指向左侧,这导致了 D 组曲线在过了 竖直方向中线一段距离后才开始向右侧偏移。

结论 5

(1) 基于表面张力与电双层理论,建立了 NaOH 电解液中液态金属的驱动力模型。

(2) 通过实验得到了驱动不同颗粒大小的液态 金属的阈值电压,并将实验结果进行线性回归分析, 得到了一定范围内的液态金属直径 d、电极距离 ε 、 电解液浓度 φ 与阈值电压 V 的关系: V = 17.136 -11.496*φ* + 1.497*ε* - 2.173*d*。结果表明,阈值电压 与液态金属颗粒大小和溶液浓度呈负相关,与电极 间距呈正相关。

(3) 对多电极复合电场作用下的水平空间和竖 直自由空间的液态金属运动轨迹与电场关系进行了 仿真与实验。结果表明,液态金属颗粒的运动与电 场的分布有着密切的关系,其运动的方向恰与电场 方向相反。与水平空间相比,竖直自由空间由于不 受基板对颗粒摩擦力的作用,使得其运动所需的阈 值电压要比水平空间的阈值电压低。当溶液浓度和 颗粒大小相同时,适当增加电场强度可提高液态金 属颗粒的运动速度。

(4)可通过电场布置及施加电压的大小来实现 对液态金属运动轨迹的控制,对于液态金属微流控 制系统、流体抛光等领域具有一定参考意义。

参考文献

- [1]周酉林,刘宜伟,郭智勇,等.基于液态金属的可拉伸 导线制备与性能研究[J]. 功能材料, 2018, 49(3): 3152-3159
- [2] 杨勇, 焦志伟, 杨卫民, 等. 室温液态金属直写成型 工艺研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(11): 20-26
- [3] JIE Z, YAO Y, LEI S, et al. Self-fueled biomimetic liquid metal mollusk [J]. Advanced Materials, 2015, 27 $(16) \cdot 2648 - 2655$
- [4] TANG S Y, SIVAN V, PETERSEN P, et al. Liquid met-

al actuator for inducing chaotic advection [J]. Advanced Functional Materials, 2015, 24(37):5851-5858

- [5]王道林,高长永,贺强.可变形、融合的棒状液态金属 游动纳米机器人[C]//中国化学会第十七届全国胶体 与界面化学学术会议,哈尔滨:哈尔滨工业大学微纳 米技术研究中心,2019:3
- [6] 叶姣,陈建业,刘静. 液态金属双流体机器人[J]. 中国科学:技术科学,2019,49(6):619-626
- [7] 熊建钧, 严骏杰, 杨敏. 镓基液态金属微/纳米液滴的 合成及其在生物医学中的应用[J]. 生物医学工程研 究, 2020, 39(4): 425-430
- [8] 姚飞. 液态金属的应用[J]. 科技视界, 2019(5): 129-131
- [9] HE J F, LIANG S T, LI F J, et al. Recent development in liquid metal materials [J]. ChemistryOpen, 2021, 10 (3): 360-372
- [10] LV H, ZHANG L, YANG F, et al. A novel 3D-printed device for localization and extraction of trabeculae from human femoral heads: a comparison with traditional visual extraction[J]. Osteoporosis International, 2015, 26(6): 1791-1799
- [11] SUN W, YU J, CAI Y. Influence of magnetic field, magnetic particle percentages, and particle diameters on the stiffness of magnetorheological fluids [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(20):1-14
- [12] ZHANG J, GUO R, LIU J. Self-propelled liquid metal motors steered by a magnetic or electrical field for drug delivery[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2016, 4 (32):5349-5357
- [13] 白冰鹤, 陆规, 闵琪, 等. 电毛细驱动液态金属液滴

可寻址运动特性研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41 (8): 1845-1850

- [14] ELASSY K S, RAHMAN M A, SHIROMA W A, et al. Liquid-metal nodal sheet for reconfigurable devices and circuits[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 167596-167603
- [15] YAO Y Y, LIU J. A polarized liquid metal worm squeezing across a localized irregular gap[J]. RSC Advances, 2017, 7(18):11049-11056
- [16] YAO Y Y, LIU J. Liquid metal wheeled small vehicle for cargo delivery[J]. RSC Advances, 2016, 6(61):56482-56488
- [17] YANG X H, TAN S C, YUAN B, et al. Alternating electric field actuated oscillating behavior of liquid metal and its application[J]. 中国科学:技术科学(英文版), 2016, 59(4):597-603
- [18] BILODEAU R A, ZEMLYANOV D Y, KRAMER R K. Liquid metal switches for environmentally responsive electronics[J]. Advanced Materials Interfaces, 2017, 4(5): 1600913
- [19] ZENG H, FEINERMAN A D, WAN Z, et al. Piston-motion micromirror based on electrowetting of liquid metals
 [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 14(2):285-294
- [20] GRAHAME, DAVID C. The electrical double layer and the theory of electrocapillarity. [J]. Chemical Reviews, 1947, 41(3):441-501
- [21] TANG S Y, KHASHAYAR K, VIJAY S, et al. Liquid metal enabled pump [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(9):3304-3309

Motion characteristics of compound electric field of gallium-based room temperature liquid metal

ZHANG Li, CHEN Qiang, LI Yanbiao

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032)

Abstract

As a new functional material, gallium-based room temperature liquid metal has been widely concerned in various fields. It is a simple method to drive liquid metal to move by electric field, but there are few researches on the movement characteristics of liquid metal under the action of compound electric field. In this paper, the driving force model of liquid metal is established based on the theory of surface tension and electric double layer. The threshold voltages with different liquid metal particle size, electrode distance and electrolyte concentration are got by experiments, besides, the linear regression model of them in a certain range is obtained. Moreover, the simulation and experimental research on the movement of liquid metal particles under the action of complex electric field in horizontal and vertical free space are carried out. The results show that within a certain range, the threshold voltage is negatively correlated with particle size and electrolyte concentration, and positively correlated with electrode distance. The movement track of liquid metal in composite electric field is related to the distribution of electric field. Thus, the movement track and speed of liquid metal can be controlled by the arrangement of electric field.

Key words:gallium-based liquid metal, compound electric field, motion control, surface tension, threshold voltage