

# “失重”极化液滴在非均匀电场中的运动

周凯伟, 张慧纯, 崔倚瑞, 黄奇恩, 黄秋萍, 熊正烨

(广东海洋大学 理学院, 广东 湛江 524088)

**摘 要:**以植物油的浮力抵消酒精和水的混合液滴的重力,用酒精和水的混合液滴模拟了微重力下的气泡,可以清楚看到酒精和水的混合液滴悬浮在植物油中,因表面张力作用而呈球形.设计可产生具有旋转对称性非均匀电场的装置,观测了悬浮液滴在非均匀电场中的运动.实验结果表明不带电的悬浮液滴在具有旋转对称性的非均匀电场中受到与液滴位置的三次方成反比的力的作用.

**关键词:**失重;液滴;极化;非对称电场

**中图分类号:**O441

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-4642(2015)05-0007-05

## 1 引 言

“神舟十号”的成功发射标志着我国载人航天技术走向成熟,随着载人航天技术的不断发展,我国的空间实验室也在建设当中,微重力下新兴的学科应运而生.微重力气泡动力学作为新兴学科研究前景广泛<sup>[1]</sup>,目前控制气泡运动的方法有外加声场方法<sup>[2]</sup>、设置温度梯度方法<sup>[3]</sup>等,这些方法的共同特点是通过外场来控制气泡的运动.“神舟十号”在轨运行期间,王亚平航天员展示了水在微重力下的实验.微重力下可以看到许多地球上看不到的物理现象,比如,在微重力的条件下由于浮力消失,液体的表面张力起主要作用,悬浮在空间的水包呈现球形,而且水包中往往会出现气泡,如何排除和控制这些气泡是微重力应用的一个重要问题.本实验用小液滴在地面实验室模拟“失重气泡”,并且设计实验装置产生轴对称非均匀外电场,研究了“失重气泡”在非均匀电场作用下的运动.

## 2 实验原理

### 2.1 “失重气泡”模拟

飞船绕地球飞行时,飞船内的物体虽然受到地球的引力作用,但引力充当了环绕地球运动所需的向心力.因此,若以飞船为参考系,飞船内物

体受到地球的引力作用,同时也会受到惯性离心力作用.惯性离心力与物体受到的引力平衡,物体处于“失重”状态.在飞船内,液体中的气泡不再受到浮力作用,且处于“失重”状态,气泡在表面张力的作用下呈球形.

在惯性参考系中,当物体浸入液体中时,若物体的密度与浸泡它的液体密度相同,物体所受浮力与重力相等,此时物体将悬浮于液体中.若物体为与浸泡液体不相溶的液滴,浸泡液体与液滴之间会形成界面层,界面层的表面张力将使液滴呈球形.可以将该球形液滴视为“失重气泡”.水和酒精可以互溶,而且都不溶于植物油;纯净水的密度略大于食用油的密度,而酒精的密度略小于植物油的密度,酒精和水形成的混合液的密度介于水和酒精之间.所以适当控制水和酒精的比例,可获得密度与食用油密度相等的酒水混合液体.酒精和水形成的混合液滴,可以悬浮于植物油中,可视为“失重气泡”.

### 2.2 “失重气泡”的极化

在外电场作用下,介质表面产生极化电荷的现象,叫做电介质的极化现象<sup>[4-5]</sup>.在电介质内,如果电介质的密度是均匀的,任一小体积内所含有的异号电荷数量相等,即电荷密度仍然保持为零.但在电介质与外电场垂直的 2 个表面上却要分别出现正电荷和负电荷,通常称之为极化电荷

收稿日期:2014-10-20;修改日期:2015-03-06

作者简介:周凯伟(1991-),男,广东汕头人,广东海洋大学物理与光电科学系本科生.

指导教师:熊正烨(1972-),男,湖北公安人,广东海洋大学理学院副教授,博士,主要研究方向为辐射物理.

或束缚电荷. 电场越强产生的极化电荷就越多, 介质的极化也越强. 当外电场撤消后, 极化现象也随之消失<sup>[6]</sup>.

浸泡在植物油中的水和酒精的分子可以被称为有极分子, 此类分子的正、负电荷“重心”本来就不重合, 分子具有固有电矩. 无外场时, 由于分子的无规则热运动, 分子电矩取向杂乱无章, 所有分子的固有电矩矢量和为 0, 宏观上没有极化电场. 也就是说, 在没有外电场作用时, 酒精和水的混合液滴没有宏观电偶极矩. 在有外电场作用时, 有极分子趋向于外电场方向取向排列, 这就是有极分子的取向极化<sup>[4]</sup>. 也就是说, 在有外电场作用时, 酒精和水的混和液滴会产生宏观电偶极矩  $P$ . 电偶极矩的大小一般与电场强度的大小成正比.

### 2.3 处于电场的球形液滴的电偶极矩

各向同性的球形液体在外电场中的电偶极矩与外电场强度的大小成正比. 理论计算表明<sup>[6]</sup>, 各向同性球形物体在外电场中的电偶极矩可以表示为

$$P(E) = 4\pi\epsilon_0 \left[ \frac{(\epsilon_r - 1)R^3}{\epsilon_r + 2} \right] E, \quad (1)$$

式中的  $E$  为外电场的电场强度,  $\epsilon_0$  为真空电容率,  $\epsilon_r$  为球形物体的相对电容率,  $R$  为球形液滴的半径.

处于电场中悬浮于食用油中的酒精和水混合液滴, 式(1)中的  $\epsilon_r$  为混合液相对于食用油的电容率, 即:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{r\text{混合液}}}{\epsilon_{r\text{食用油}}}. \quad (2)$$

### 2.4 不均匀电场中电偶极矩的受力分析

假定非均匀电场沿  $x$  方向逐渐增大, 其电场梯度可以表示为  $\frac{\partial E}{\partial x}$ , 如果将液滴的平均极化强度矢量大小表示为  $P$ . 由于油和液滴都是各向同性, 液滴的极化强度矢量方向必然与液滴所在位置的电场方向一致, 则液滴在该非均匀电场中的受力为<sup>[4]</sup>

$$F_x = P_x(E) \frac{\partial E}{\partial x}. \quad (3)$$

力的方向与电场强度梯度方向一致, 也就是说, 液滴在非均匀电场中将会受到电场力作用. 在该电场力的作用下, 液滴的运动状态会产生变化. 当然, 液滴除了受到重力和浮力这对平衡力之外, 在

运动过程中, 还会受到食用油给它的阻力. 所以通过控制电场强度大小和电场梯度, 就可能控制液滴的运动.

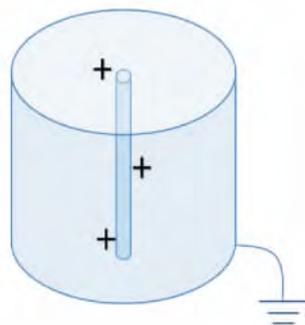
## 3 实验设计方案及装置

### 3.1 “失重气泡”的模拟

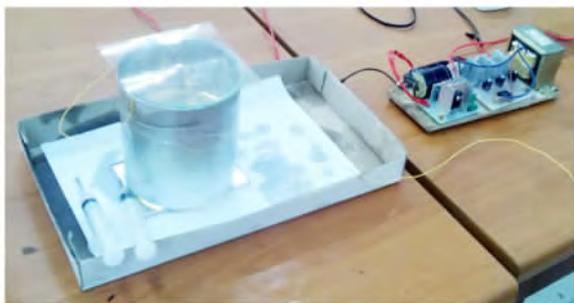
用胶头滴管取适量酒精与 10 mL 水充分混合; 另取半烧杯的大豆油, 用注射器取 0.5 mL 酒精与水的混合液, 并且注入大豆油中, 观察混合液滴在豆油中浮沉情况. 若液滴下沉, 则在混合液中加入适量酒精; 若液滴上浮, 则在混合液中加入少量纯净水. 如此反复多次, 就可以得到恰好可悬浮于豆油中的酒精与水的混合液. 不同品牌的豆油德密度可能略有差别, 所以酒精与水的混合液需要视实情配制. 配置完后, 将溶液保存于棕色瓶中. 需做实验时, 用注射器取少量酒精与水的混合液, 将注射器针头深入大豆油中, 注入少量酒精与水的混合液, 混合液就会呈球形悬浮于大豆油中. 酒精和水的球形液滴就是模拟的“失重气泡”.

### 3.2 产生非均匀旋转对称电场的装置

由式(3)知, 液滴在非均匀电场中会受到电场力作用, 可通过控制电场力从而控制液滴运动. 为了计算方便, 设计的非均匀电场具有旋转对称性. 实验装置与放大的同轴电缆相似, 中间为一圆柱形导体, 直径  $d$  为 3 mm, 外围为一圆筒状导体, 直径  $D$  为 120 mm. 给中间的圆柱形导体加上正的高压, 将外围的圆筒导体接地. 圆柱和圆筒之间就会形成非均匀旋转对称电场, 该区域可填充豆油, 并在豆油中注入可悬浮的浮酒精和水的混合液以模拟“失重气泡”. 示意图见图 1(a), 具体实验装置照片见图 1(b).



(a) 示意图



(b) 实物照片

图 1 产生非均匀旋转对称电场的装置

### 4 实验现象及其解释

#### 4.1 实验过程和现象

在可产生非均匀轴对称电场的容器中注满豆油,静置一段时间,以排走气泡.用注射器取少量配置好的酒精和水的混合溶液,在豆油液面以下 2~3 cm 深处注射直径为 2~4 mm 的液滴,轻轻摇动注射器使液滴与注射器分离,此时液滴可呈球形悬浮于豆油中.

由于摇动,刚注射进去的液滴会运动,但豆油的黏滞阻力会使液滴很快停止运动.待液滴停止运动后,接通高压电源,此时豆油中产生辐向分布的非均匀电场.悬浮于豆油中的液滴被极化的同时,也会受到电场力作用.此时按下秒表,开始计时,并同时记录液滴位置.

加上电场后,液滴会逐渐向中心带正电的导体运动,且速度由慢逐渐加快.当液滴接近中央导体时,会被弹开.弹开后,液滴会停留片刻,然后又向中央电极靠近.

#### 4.2 实验现象解释

液滴在电场中极化产生电偶极矩.电偶极矩不为 0 的液滴在非均匀电场的作用下会向中央电极靠近.当液滴接近中央电极到一定程度时,液滴与中央电极间的豆油被击穿<sup>[7]</sup>.在击穿过程中,液滴靠近中央电极端的负电荷会向中央电极释放,此时整个液滴会带上大量的净正电荷.此时,净正电荷的电场力不是指向中央电极,而是反向,液滴在该电场力的作用下被弹开.

液滴被弹开后,有段时间液滴会停在远方几乎不动.此时净正电荷电场力与电偶极矩的非均匀电场力几乎平衡.然后净正电荷慢慢消散,电偶极矩非均匀电场力(指向中央电极方向)逐渐占优势,液滴又会向中心运动.

### 5 实验结果及分析

如前所述,加上电压后,悬浮于豆油中的液滴会在非均匀电场中逐渐向中央电极运动.在所加电压为 1 800 V 时,粒径约为 4 mm 的液滴在豆油中的运动位置随时间的变化关系如图 2 所示.

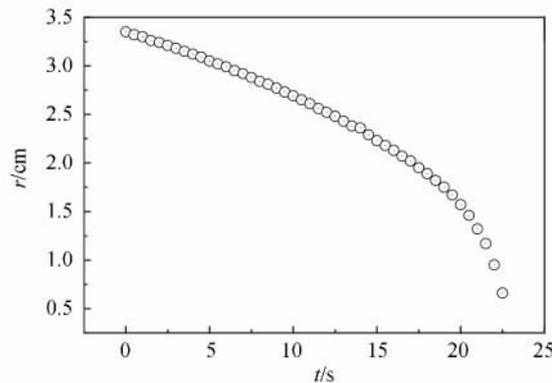


图 2 液滴的位置随时间的变化

图 2 中的横坐标表示非均匀电场的作用时间,纵坐标表示液滴离中心电极的距离.由图 2 可知,随着施加电场时间的延长,液滴逐渐向中央电极靠近,且速度越来越快.测量的位置和时间关系已知,利用插值法可求出液滴在任意时刻或任意位置的速度和加速度.

由于非均匀电场具有旋转对称性,可只考虑液滴在水平面内的运动情况.此时,不带电液滴受到的电场力大小应改写为

$$F_r = P_r(E) \frac{dE}{dr} \tag{4}$$

假定中间圆柱所带电量线密度为  $\lambda$ ,所加电压为  $V$ ,易知半径为  $r$  处的电场强度大小可以写为<sup>[5]</sup>

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi r \epsilon_r \epsilon_0} = \frac{V}{r \ln(D/d)} \tag{5}$$

与(1)式和(4)式结合,可算出不带电液滴在  $r$  处所受电场力为

$$F(r) = \alpha \frac{V^2}{\ln^2(D/d)} \cdot \frac{1}{r^3} \tag{6}$$

式中的  $\alpha$  为与液滴大小和材料有关的比例系数,具体可表为

$$\alpha = 4\pi\epsilon_0 \frac{(\epsilon_r - 1)R^3}{\epsilon_r + 2} \tag{7}$$

可见,不带电液滴在具有旋转对称性的非均匀电场中,其受到的电场力与所加电压的平方成正比,

与中心电极距离的 3 次方成反比. 根据图 2 实验数据, 利用插值法求出液滴在任意时刻或任意位置的加速度, 可算出悬浮液滴在豆油中的加速度  $a$  与所在位置的倒数 ( $1/r$ ) 之间的关系, 见图 3. 拟合曲线方程为

$$a = (1.36 \pm 0.05) \frac{1}{r^3} - \left[ (1.02 \pm 0.05) \frac{1}{r^2} - (0.20 \pm 0.02) \frac{1}{r} \right]. \quad (8)$$

显然, 式(8)等号右边第一项为电场力所产生的加速度分量, 与前面导出的电场力与液体位置之间的关系一致.

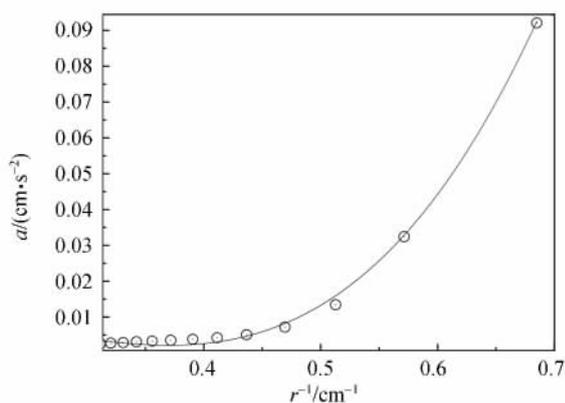


图 3 悬浮液滴的加速度  $a$  与所在位置的倒数 ( $1/r$ ) 之间的关系

根据实验数据, 利用插值法求出液滴在任意时刻或任意位置的速度, 可算出悬浮液滴在豆油中的速度  $v$  与所在位置的倒数 ( $1/r$ ) 之间的关系, 见图 4. 拟合曲线方程为

$$v = (0.39 \pm 0.03) \frac{1}{r^2} + (0.04 \pm 0.02) \frac{1}{r}. \quad (9)$$

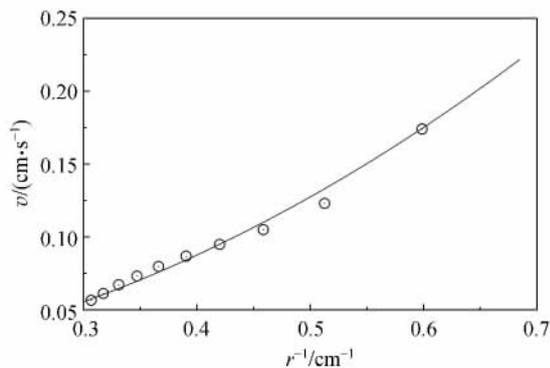


图 4 悬浮液滴的速度  $v$  与位置的倒数 ( $1/r$ ) 之间的关系

从拟合方程可以看出, 悬浮液滴与位置的倒数为二次函数关系, (9) 式等号右侧第二项可化为  $\frac{1.02}{0.39}v - 0.22 \frac{1}{r}$ , 说明该项为阻力所产生的加速度<sup>[8-9]</sup>. 在液滴速度不太大时, 液滴的阻力一般与速度的大小成正比. 由于液滴在电场中受到极化后, 液滴两侧因受到静电场力而产生变形, 随着  $r$  的减小, 电场强度越强, 液滴形变就越严重. 这种形变导致阻力改变的修正项可以用  $-0.22 \frac{1}{r}$  来表示.

## 6 结 论

以植物油的浮力抵消酒精和水的混合液滴的重力, 用酒精和水的混合液滴模拟了微重力下的气泡, 可以清楚看到酒精和水的混合液滴悬浮在植物油中, 因表面张力作用而呈球形. 设计了可产生具有旋转对称性非均匀电场的装置, 经过系统研究, 可以得到以下结论:

1) 计算表明, 不带电的液滴在辐向非均匀电场下, 悬浮液滴会受到电场力, 悬浮液滴受到的电场力与液滴位置的三次方成反比;

2) 测量了悬浮液滴在具有旋转对称性的非均匀电场中的运动过程, 并且根据实验所测运动过程数据拟合出了液滴的加速度和液滴位置之间的关系, 证明了不带电的悬浮液体在具有旋转对称性的非均匀电场中的确会受到与液滴位置的三次方成反比的力的作用, 该力就是电偶极矩的电场力;

3) 悬浮液滴在运动过程中存在电荷的积累和消散过程, 液滴在接近中央电极时, 液滴与电极之间的介质(大豆油)会被击穿, 液滴会因此带净正电荷而受到很大的辐向电场力并反向运动.

## 参 考 文 献:

- [1] 赵浩宇, 毕思思, 周爱, 等. 微重力环境下蜡烛火焰与油滴沉降的实验研究[J]. 物理实验, 2011, 31(3): 33-37.
- [2] 沈壮志, 林书玉. 声场中气泡运动的混沌特性[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 104302.
- [3] 李斌, 白博峰, 阎晓, 等. 微气泡形成过程及温度影响[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(9): 1511-1514.
- [4] 方俊鑫, 殷之文. 电介质物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

- [5] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学[M]. 北京:高等教育出版社,1991:45-94,177-187.
- [6] Kasap S O. Principle of electronic materials and devices [M]. New York: Mc Craw-Hill Higher Education, 2005.
- [7] 李文长. 关于液体电介质在非均匀电场作用下的成桥现象[J]. 大学物理,2013,32(12):24-28.
- [8] 陆申龙,金浩明,曹正东. 液体粘滞系数与温度关系实验及曲线拟合[J]. 物理实验,1988,8(3):122-124.
- [9] 王文周. 关于落球法测粘滞系数的公式和使用范围[J]. 物理实验,1991,11(2):49-50.

## Motion of weightless polarized droplets in non-uniform electric field

ZHOU Kai-wei, ZHANG Hui-chun, CUI Yi-rui,

HUANG Qi-en, HUANG Qiu-ping, XIONG Zheng-ye

(School of Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** This paper provided an example of weightless droplet, its weight was offset by the buoyancy of oil. The spherical droplet, which was a mix of alcohol and water, suspended in oil, just like a bubble suspended in liquid bag in microgravity condition. An experimental device which could generate rotationally symmetric non-uniform electric field was developed, and the motion of suspending droplet in non-uniform electric field was measured and interpreted.

**Key words:** weightlessness; droplet; polarization; non-uniform electric field

[责任编辑:任德香]

## 欢迎订阅 欢迎投稿

《物理实验》创刊于1980年,是教育部主管、东北师范大学主办的学术期刊,是教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会的会刊。

《物理实验》主要刊载物理实验成果,交流物理实验教学改革的 new 思想、新方法、新动态。开设的栏目有:实验教学,实验与应用,数据处理与误差分析,仪器设计与使用,实验教学研究,基础教育研究,实验技术与技巧,集锦,问题讨论,国外实验教学介绍,学生园地等。适合于物理实验工作者,大、中学校的物理教师,理工科的本科生、研究生及教学仪器研制人员阅读。

《物理实验》愿为广大作者提供交流信息的窗口,展示成果的园地,为广大读者提供丰富的精神食粮,为广大仪器生产厂家提供展示成果的舞台。

《物理实验》杂志为月刊,全国各地邮局均可订阅,邮发代号为12-44。若错过邮局订阅时间,可直接与编辑部联系。

《物理实验》编辑部