

文章编号:1005-4642(2021)02-0043-06

## 辐射状电场中大量镀金属膜小球运动的实验研究

苏亚凤,王琪琨,张俊武,张 沛

(西安交通大学 物理学院,陕西 西安 710049)

**摘 要:**通过实时观察辐射状电场中大量镀金属膜小球的运动,发现处于不同介质中的小球群体行为完全不同:处于空气中的小球在阴阳两极之间来回杂乱进射,处于蓖麻油中的小球呈现类蠕虫运动的自组织过程,处于机油和蓖麻油混合介质中的小球表现为类沸腾运动现象.分析表明:空气中的现象成因是小球与电极及相互间所带电荷的异同呈现的静电吸引或排斥结果;黏度较大的蓖麻油中的现象成因是在电场作用下静电感应和介质极化形成类似于电偶极子链的小球串,小球串的尖端因充放电导致相邻串间时而吸引、时而排斥而呈现出类蠕虫运动;黏性和介电性能比蓖麻油低的混合油中的现象成因是较弱的电偶极子串被局域击穿、气泡破裂和变化的电风作用下的三维杂乱运动.

**关键词:**辐射状电场;进射行为;自组织过程;类沸腾运动

**中图分类号:**O441.1

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.02.008

处于介质中的大量金属小球在电场作用下的运动行为与自然界的很多开放系统的自组织过程类似,因此近年来 Alfred Hübler 等研究者对此实验做了广泛的探索<sup>[1-6]</sup>.本课题组研究了树枝状分形的分维数与电压的关系<sup>[2]</sup>及初始状态和加电压过程对自组织过程的影响<sup>[4-5]</sup>.但实验研究中所用介质皆为黏度较大的蓖麻油,并未对不同介质中的大量导电小球运动行为做系统研究.本文将文献<sup>[1-6]</sup>中的金属小球改为质量较轻的镀金属膜塑料球,研究了大量小球在 3 种不同介质加电场过程中的运动情况,发现其呈现不同的运动行为.本实验涉及静电学中的电荷产生电场、电场对带电体的作用、静电场中的导体和电介质 4 部分内容,展示了有限长圆柱形电极产生辐射状电场、电场对导体有力的作用、电场中的介质极化及击穿、电场吸引介质行为、导体小球在介质中的运动行为、导体尖端放电现象、电风现象和电场具有能量等实验规律,生动形象地用实验表现出流体介质、轻质导体及电场共存时之间的相互作用及运动变化行为.此实验可用于大学物理课堂演示或综合实验教学.此研究对稳态网络构建<sup>[6]</sup>、碳纳米管等导电物质在电场中自组织行为<sup>[7]</sup>、导电杂质对电解质的介电性能影响<sup>[8]</sup>等问

题的研究都有借鉴意义.

### 1 实验装置

实验装置如图 1 所示.将大量镀金属膜的导电轻质小球放入盘状玻璃容器中,中央金属杆为阳极,沿玻璃容器边缘围绕 1 周的薄铜片为阴极.用最大电压为 50 kV 的高压直流电源供电,在阴阳两极上加电压,观察小球在电场中的运动行为.

在文献<sup>[2]</sup>工作的基础上,对原有的实验装置进行改进:

1)玻璃容器的直径由原来的 150 mm 降为 95 mm,在同样电压下空间的电场更强.

2)实验中的不锈钢小球改为镀金属膜塑料小球,每个小球的质量为 39 mg,直径为 4 mm,目的是减少小球与容器间的摩擦力,使小球更容易在水平方向运动.

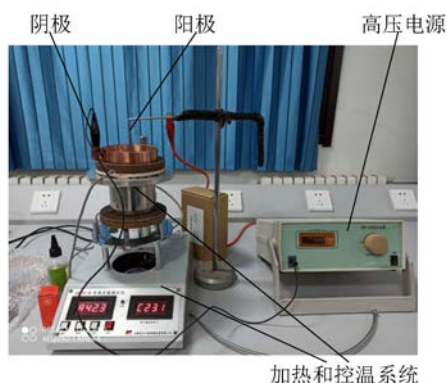
3)由于油介质的黏度对温度比较敏感,为了保证实验温度可控,在原装置上增加加热和控温系统.直接将导热系数测定仪中的加热装置倒置,在加热铜板上放置与其同样大小的橡胶垫,将盛放小球的玻璃容器放置在橡胶垫上.这里,橡胶垫起到绝缘和保温的作用.铜板内部有温度传感器,以控制容器的温度.考虑到散热因素,玻璃

收稿日期:2020-10-01;修改日期:2020-11-10

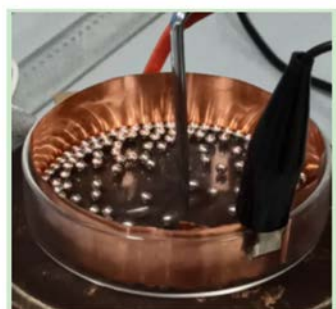
作者简介:苏亚凤(1968—),女,陕西岐山人,西安交通大学物理学院副教授,博士,研究方向为材料物理. E-mail:yfsu@mail.xjtu.edu.cn



容器内的温度与铜板温度会有差异. 因此, 待温度稳定后用温度计测量介质的温度. 实验温度控制在  $40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



(a) 实验装置实物图



(b) 实验容器放大图

图 1 实验装置

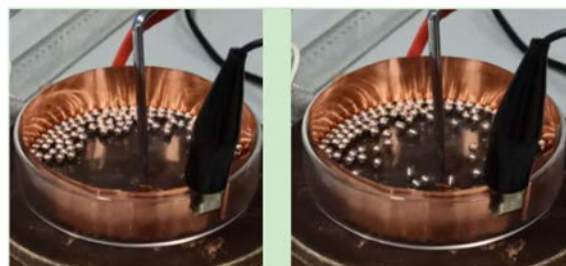
## 2 实验过程及现象

### 2.1 进射运动

将多于 100 粒小球放置在容器中央的阳极周围, 阴极沿玻璃容器的内壁围绕, 容器中未加介质, 即介质为空气, 阴阳两极电压从 0 开始逐渐增大. 实验发现: 当电压在  $0\sim 500\text{ V}$  变化时, 小球基本不动; 电压在  $500\text{ V}\sim 3\text{ kV}$  变化时, 围绕在阳极周围的外围小球零星向阴极进射, 直至阳极周围所有小球由原来紧靠阳极到离开阳极. 当电压在  $3\sim 8\text{ kV}$  变化时, 小球进一步向阴极方向运动, 到达阴极后, 电压逐渐增大时所有小球开始基本静止不动. 但当电压大于  $8\text{ kV}$  时, 小球突然开始在两极之间来回进射, 速度极高. 实验发现, 电压越高, 小球在两极之间来回进射频率越高.

图 2(a)~(f) 是在两极电压大于  $8\text{ kV}$  后实时录像每隔  $1\text{ s}$  的截图. 图 2(a) 是进射开始前的静止状态, 其后小球分布状态瞬息万变, 除过阴极

附近的部分小球静止以外, 其他小球犹如弹球一般快速在阴阳两极之间杂乱进射, 夹杂两极击穿放电瞬间的骤停, 随即继续杂乱进射.



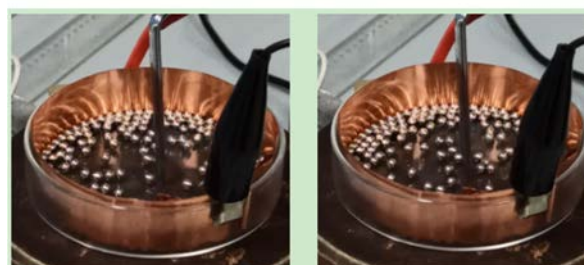
(a) 0 s

(b) 1 s



(c) 2 s

(d) 3 s



(e) 4 s

(f) 5 s

图 2 小球进射过程截图

### 2.2 类蠕虫运动

将大量小球放置在阳极周围, 阴极围绕在玻璃容器的外壁, 容器中加少量蓖麻油, 油面低于小球半径. 在两极施加电压, 电压由小到大逐渐增加. 电压在  $0\sim 6\text{ kV}$  变化过程中, 小球大致处于团聚状态, 见图 3(a). 电压到达  $6\text{ kV}$  时, 外围小球向阴极方向开始缓慢移动, 多个小球连接起来形成有序的链状, 小球链端头有左右摇摆现象, 类似蠕虫运动. 图 3(b) 是距离开始移动时间为  $12\text{ s}$  时的形貌, 可以看出, 系统向阴极方向已经形成 5 条小球链. 逐渐增大电压, 类蠕虫运动的小球链增多. 图 3(c) 是  $110\text{ s}$  电压为  $7\text{ kV}$  时的形貌, 显

示有分叉现象出现;图 3(d)是电压 7.5 kV 时 142 s 的形貌,图 3(e)是 8 kV 时 202 s 的形貌,实验显示大部分小球参与了系统的自组织过程. 图 3(f)是 9 kV 时 227 s 所形成的分形,所有原来团聚在中央阳极周围的小球已经通过自组织过程形成树枝状分形. 将电压继续增大,直到 13 kV,树枝状结构基本稳定.

(a)  $< 3 \text{ kV}, 0 \text{ s}$ (b)  $6 \text{ kV}, 12 \text{ s}$ (c)  $7 \text{ kV}, 110 \text{ s}$ (d)  $7.5 \text{ kV}, 142 \text{ s}$ (e)  $8 \text{ kV}, 202 \text{ s}$ (f)  $9 \text{ kV}, 227 \text{ s}$ (g)  $20 \text{ kV}, 316 \text{ s}$ (h)  $0 \text{ kV}, 384 \text{ s}$ 

图 3 类蠕虫运动过程截图

当电压大于 13 kV 后,系统结构崩溃,图 3(g)所示为电压 20 kV 时 316 s 的形貌. 可以看出,已经形成的小球链条突然断开,成散乱状态. 若再次减小电压,系统则重新构建为树枝状结构,图 3(h)所示是电压降为 0 时、距离开始移动为 384 s 的形貌,小球再次连接为链状,系统整体构成树枝状的分形.

如此反复增大电压再到减小电压,则系统呈现从重构分形到分形系统崩溃再到重构分形的往复过程.

### 2.3 类沸腾运动

将大量小球放置在阳极周围,阴极沿玻璃容器的内壁围绕. 容器中加入蓖麻油和机油,机油与蓖麻油的体积比约为 5 : 1,搅拌均匀;油面刚好淹没小球,目的是增大小球所受浮力,减少小球与容器底的正压力,进而减少小球与容器底面之间的摩擦力,使小球易于运动.

开始加电压时,小球大致静止不动,到 600 V 时,小球突然向四周运动散开,然后停止运动. 再继续升压过程中,局域小球移动. 当电压高于 5 kV 时,局域小球在相邻小球间有振荡现象. 高于 7 kV 时两极之间突然击穿放电. 7.6 kV 时阳极四围油面顺着阳极表面升高. 电压升到 8 kV 左右,所有小球离开了阳极. 在电压增加到 20 kV 的过程中,零星小球在两极之间有振荡. 电压超过 20 kV 后,小球振荡频率增高,参与振荡的小球数目增加. 电压增加到 25 kV 时,容器中的小球突然犹如处于沸腾的水中一般剧烈运动,小球在两极处未触及就被弹射回来;而且原来顺着阳极面爬高的油面突然消失,阳极周围出现无油的空间.

图 4(a)显示 24.9 kV 时阳极下端有油爬升现象,图 4(b)~(f)是实时录像每隔 1 s 的截图,显示容器内小球剧烈的涌动变化.

电压在 7.6~25 kV 之间变化时,阳极四围油面顺着阳极表面升高约 7 mm,见图 5(a)所示的侧位局域放大图. 在电压大于 25 kV 的瞬间,爬升到阳极表面的油消失,下方出现无油的区域,如图 5(b)所示. 电压越高,阳极周围空出的面积越大. 当电压从 39 kV 降到 22 kV 时,油面又开始顺着阳极表面上升约 7 mm. 降压过程中小球运动行为类似于电压升高过程对应的行为.

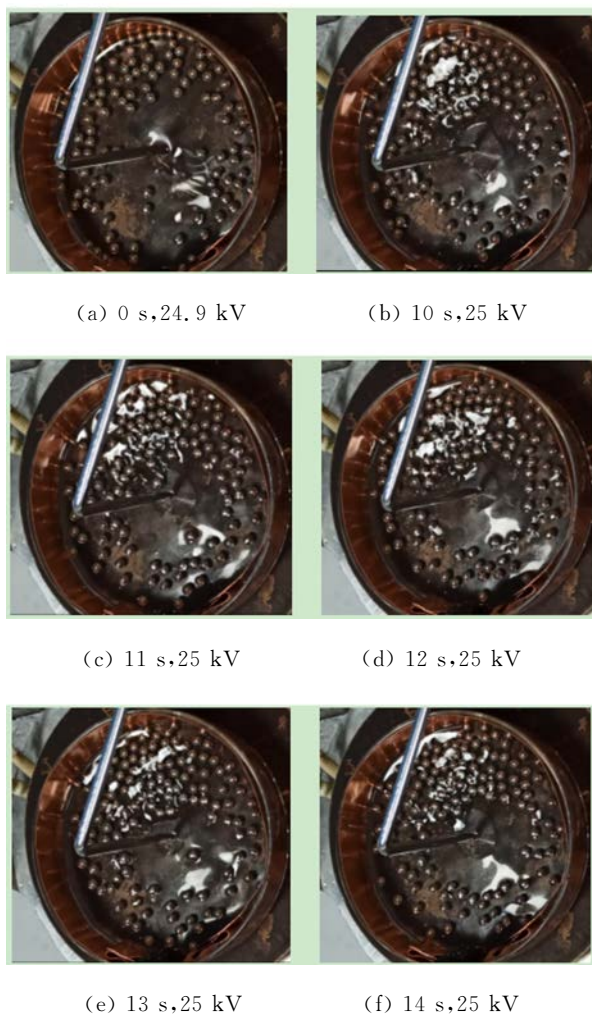


图 4 类沸腾运动过程截图



(a) 24.9 kV, 油面沿阳极爬升现象



(b) 38 kV, 阳极下方的无油区

图 5 阳极局域放大图

### 3 实验结果分析

#### 3.1 进射运动行为的分析

处于电场中的小球受重力、容器底部的支持力、摩擦力和电场力的作用。当两极施加电压时,阳极周围小球因接触阳极而带正电荷,受到阳极电场排斥力,且小球彼此之间存在排斥力。当小球所受电场力小于或等于所受摩擦阻力时,小球静止,实验中表现为电压逐渐增大时所有小球开始基本静止不动;当电场力足以克服阻力时,小球向阴极方向运动。对外围小球,由于不受其他小球的阻碍,则出现进射行为。电压越高,电场越强,所受电场力越大,小球进射速度越快。当小球接触到阴极,由于阴极接地,小球上的正电荷被移走,因静电感应,小球面向阳极的一面感应出负电荷,阳极对小球的作用力变成了吸引力,当吸引力小于静摩擦力时,小球静止在阴极附近;当吸引力大于摩擦力时,小球向阳极运动。到达阳极后,小球与阳极带同种电荷又再次被排斥,周而复始,呈现小球在阴阳两极之间来回进射的行为。大量小球的来回进射及彼此之间的相互作用使容器内呈现类似炒豆的进射现象。

#### 3.2 类蠕虫运动行为的分析

处于蓖麻油中的小球表面有 1 层油介质,小球运动时水平方向除受电场力和摩擦力外,还受油的黏滞阻力。加上电场后,阳极周围的小球带上与阳极相同性质的正电荷而被阳极排斥,因受黏滞力小球不能像在空气中一样进射。同时,处于辐射状电场的小球会发生静电感应现象,小球远离阳极的一侧带正电荷,靠近阳极的一侧带负电荷,辐射状的非均匀场又使小球受指向中央方向的电场力。2 种作用同时存在,加上小球表面包裹的油介质的极化,使小球们犹如串起来的电偶极子被排列在两极电场之中<sup>[4]</sup>。处于链的两侧的小球则由于静电感应被链所吸引,并逐渐靠近小球链到与之连接,根据吸引力的大小不同或被吸纳进球链,或成为链的分枝,最终形成有序的树枝状分形。另外,小球链之间有电场力的作用,伴随链的生长和局域放电现象,链与链之间的作用力变化,导致小球链因受力变化而左右摇摆运动,看起来犹如蠕虫蠕动一般。

实验中形成的有序分形是典型的耗散结构。根据耗散结构理论<sup>[9]</sup>,开放系统的熵变化分为 2

部分:一部分是由于系统与外界的物质和能量交换过程引起的熵流项(可正可负),一部分是由系统内部的不可逆过程产生的熵产生项。若 2 项之和为负值,即系统从外界取得的负熵流的绝对值大于系统内部的熵增加值时,系统总熵减小,系统从无序向有序进行。本实验中正是由于小球聚集体这一系统通过电极与外界交换物质和能量,使系统从外界取得的负熵流不仅抵消了系统内部的熵增加,而且使系统的总熵减小,从而形成了有序的树枝状耗散结构。

若进一步加大电压,超过一定电压值后,施加的外力与所形成的树枝状结构的阻抗不匹配时,有序结构就会崩溃。通过放电耗散掉多余能量后,系统又会重新自组织形成有序结构。若再次超过稳定系统所能承载的电压,系统又会崩溃。如此崩溃再重构过程可以反复发生,系统犹如具有自修复功能的有机体。

### 3.3 类沸腾运动行为的分析

在蓖麻油介质中加入机油后,介质的黏性减小。若容器中所加的介质油淹没了小球,则小球所受浮力相对未被淹没时大。以上 2 个因素导致小球运动时阻力减小。另外,混合油的黏性和介电性能低于蓖麻油,因此小球很难像在蓖麻油中一样形成稳定的电偶极子串。加电场时,导电小球与阳极接触,因带电荷电性与阳极相同,被阳极排斥向阴极运动。当小球运动至阴极,所带电荷被移走,小球因静电感应而受阳极吸引,向阳极方向运动。如此往复,小球在水平方向被迫在两极之间来回振荡。

另一方面,阳极尖端的强电场使其附近空气被电离,电子向阳极运动,正离子朝远离阳极的方向运动,而正离子的质量远大于电子,因而形成背离阳极方向的电风。电风因阳极的充放电而变化,导致油面在电风和重力的作用下上下起伏不定,进而使处于油中的小球上下运动。同时,变化的电风可能使介质中有更多的空气气泡混入,而气泡在电场的作用下会被沿电场方向拉长,使其由球形变成椭球形,电场增强到一定程度,气泡会破裂<sup>[10-11]</sup>。处于介质中的导电小球周围电场会发生畸变,即小球沿电场方向和垂直电场方向的电场不同<sup>[8,11-12]</sup>。小球是运动的,使其周围畸变电场的相对较强的电场分布位置发生变化,强电场作用下的介质中气泡破裂的位置必然是变化不定

的。大量小球的存在和气泡位置的随机性导致破裂气泡随机大量存在,实验上表现为小球犹如漂浮在波浪中的物体一样起伏运动。

小球水平与上下运动同时存在,使整个系统呈现犹如沸腾一般的运动行为。

### 3.4 阳极下方油面突变原因

电场较弱时,油介质被极化,阳极吸引油介质,导致油介质沿阳极表面向上爬行。油同时受重力作用,二力平衡时,油面不再上升,保持稳定的高度,出现如图 5(a)所示的状态。

另一方面,处于电场中的小球周围电场畸变<sup>[8,11-12]</sup>,油介质中的气泡会在电场作用下变形及至瞬间破裂。由于阳极周围电场最强,所以阳极周围的介质应最先被击穿,周围的气泡也会最先破裂。介质被击穿后被阳极排斥和气泡的破裂离开阳极都会导致阳极附近出现油面凹陷现象。

油介质离开阳极后,空气会在电场增强到一定程度时被电离,电离产生的电子向阳极运动,正离子远离阳极运动,由于正离子质量远大于电子质量,从而产生的电风方向表现为由阳极尖端向外。在电风作用下,油介质向进一步远离阳极的方向运动。电场越强,阳极尖端电风越强,吹开的中央无油面积就越大,出现如图 5(b)所示的状态,即阳极下方的油全部向四周运动而出现了凹下去的空位。

## 4 结 论

在辐射状强电场的作用下大量镀金属膜导电轻质小球系统所处介质不同,会出现不同的运动行为:在空气中呈现在两极之间快速杂乱进射行为;在蓖麻油中呈现类蠕虫运动的自组织过程,形成树枝状的分形,且出现在电场增大到一定程度下的系统崩溃和电场减小到一定程度的重构现象;在混合油中呈现类沸腾运动。分析表明,上述现象是由于不同介质中小球受外电场力、黏滞力及相互之间的作用力不同所致;空气中小球之间是因所带电荷种类的异同而引起的吸引或排斥;黏度较大的蓖麻油中则由于黏性使小球形成较强的类电偶极子链,链端在强电场作用下充放电使相邻链间时而吸引、时而排斥,表现为在外场下的缓慢蠕虫运动;混合油中是弱链接的类电偶极子短链被局域击穿、气泡破裂和变化的强电风作用下的三维杂乱运动。

## 参考文献:

- [1] Jun J K, Hübler A H. Formation and structure of ramified charge transportation networks in an electromechanical system [J]. PNAS, 2005, 102(3): 536-540.
- [2] 苏亚凤,李普选,陈鹏,等. 树状分形结构形成过程的实验研究[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4531-4535.
- [3] Hübler A, Crutchfield J P. Order and disorder in open systems [J]. Complexity, 2010, 16(1): 6-9.
- [4] 苏亚凤,李普选,徐忠锋,等. 一个自组织过程的演示实验及其在大学物理教学中的作用[J]. 大学物理, 2011, 30(6): 20-23.
- [5] 苏亚凤,李普选,徐忠锋,等. 初始状态对自组织演化过程的影响[J]. 大学物理实验, 2015, 28(2): 60-65.
- [6] Stephenson C, Lyon D, Hübler A. Topological properties of a self-assembled electrical network via ab initio calculation [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41621.
- [7] Belkin A, Hübler A, Bezryadin A. Self-assembled wiggling nano-structures and the principle of maximum entropy production [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8323.
- [8] 程林,李兴兴,唐炬,等. 不同温度下含金属微粒的流动液体绝缘介质放电形成过程与机理分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2917-2925.
- [9] 徐孺英. 横断学科简论[M]. 济南: 山东大学出版社, 1990: 260.
- [10] 王晓明,黄旭艳. 放电反应器中掺杂介质受电场力分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 57-59.
- [11] 董智广,郁鸿凌,董伟,等. 电场中汽泡行为的变化及对沸腾换热的影响[J]. 化工学报, 2009, 60(1): 15-20.
- [12] 王晓明,赵莹. 等离子体反应器多相介质电场畸变分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 41-43, 46.

## Experimental study on the movement of a large number of metal-coated balls in radial electric field

SU Ya-feng, WANG Qi-kun, ZHANG Jun-wu, ZHANG Pei

(School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Through real-time observation of the movement of a large number of metal-coated balls in radial electric field, it was found that the group behavior of small balls in different dielectric environments was completely different. The results showed that the balls in the air were ejected between cathode and anode, and the balls in castor oil presented a worm-like self-organization process, while the balls in the mixture of machine oil and castor oil behaved like boiling motion. The analysis showed that the electrostatic attraction or repulsion in the air was due to the similarities and differences of charge between the balls and electrodes and each other; in the castor oil with high viscosity, a string of small balls similar to the electric dipole chain was formed by electrostatic induction and dielectric polarization under the action of electric field; the tip of the string appeared worm-like motion due to the attraction and repulsion between adjacent strings caused by charge and discharge; the viscosity and dielectric properties of castor oil mixtures were lower than those of castor oil, where the weak electric dipole strings were locally punctured by bubbles bursting and changing under the action of electrical wind in three-dimensional chaotic motion.

**Key words:** radial electric field; ejection behavior; self-organization process; boiling-like movement

[责任编辑:任德香]