

# 感应荷电中带电装置参数影响的实验研究

孙伊伟, 覃粒子

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

**摘要:**建立了一套大流量荷电喷雾实验系统,并采用网状目标法收集测量荷电喷雾中的剩余电荷。通过测量不同绝缘罩材质、感应带电环的直径以及感应带电环与喷嘴间垂直距离下的喷雾荷质比,系统研究了上述参数对荷电效果的影响。实验结果表明,尼龙材料绝缘罩更有利于细水雾感应带电实验研究的进行;细水雾感应带电量与感应带电环直径呈负相关;为了增大细水雾感应带电量,应尽量将感应带电环与喷嘴的垂直距离控制在一定范围内。该研究结果对于提高液滴的荷电效果、促进荷电水雾在工业方面应用具有重要指导意义。

**关键词:**感应荷电;荷质比;网状目标法;实验分析

**本文引用格式:**孙伊伟,覃粒子.感应荷电中带电装置参数影响的实验研究[J].兵器装备工程学报,2018(2):172-176.

**Citation format:**SUN Yiwei, QIN Lizi. Experimental Study on the Influence of Charging Device Parameters in Induction Charged Spray[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018(2): 172-176.

中图分类号:O441; TM15

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2018)02-0172-05

## Experimental Study on the Influence of Charging Device Parameters in Induction Charged Spray

SUN Yiwei, QIN Lizi

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** A set of experimental system of large flow charge spray was established, and the net charge in the charged spray was collected by the mesh target method. By measuring the spray specific ratio of the different insulation cover material, the diameter of the induction live ring and the distance between the induction ring and the nozzle, the influence of these parameters was systematically studied. Experimental analysis showed that nylon material insulation cover is more conducive to the experimental study of water mist induction charge; the charge of the water mist is negatively correlated with the diameter of the inductive ring; to increase the water mist induction charge, the distance between the induction ring and the nozzle should be restrict within a certain range. The results of this study have important guiding significance for improving the charging effect of droplets and promoting the application of charged water mist in industry.

**Key words:** induction charging; specific charge; mesh target method; experimental analysis

收稿日期:2017-10-05;修回日期:2017-11-02

作者简介:孙伊伟(1991—),男,硕士研究生,主要从事流体稳定性分析及雾化研究。

通讯作者:覃粒子(1978—),男(土家族),副教授,主要从事气液两相流流动、超声速喷管内流动与型面设计、脉动燃烧与脉冲喷气推进研究,E-mail:qinlizi@126.com。

细水雾以环境友好、控温防烟效果好、灭火迅速、耗水量低、破坏性小等特点,已被看成传统高效灭火剂——卤代烷<sup>[1]</sup>的主要替代品。

考虑特定条件或环境下,如核潜艇、航空航天飞行器等密闭空间中,细水雾灭火性能得不到充分发挥:如由于障碍物的存在,细水雾不能直接作用到火焰的根部,冷却火焰燃料表面的灭火机制不能有效发挥,影响细水雾灭火效果<sup>[2]</sup>。另外,细水雾因雾滴直径小,在灭火过程中易受风流扰动,已有研究表明,随着细水雾粒径的减小,雾冲量也随之减小,在火场热气流下,很难到达火焰区,且到达油池面的概率更小,灭火效果也不好<sup>[3]</sup>。静电雾化技术则是一种理想的可以有效控制雾化过程,达到人为控制雾滴的分布、粒径和行为的手段,主要是让细水雾带有某种电荷,再根据电荷种类实现特定的目的。关于荷电细水雾的研究主要体现在农药喷洒<sup>[4]</sup>、工业除尘<sup>[5]</sup>、家装喷涂<sup>[6]</sup>等方面。目前,已有研究表明,外加电场对喷雾流场的分布、火焰的燃烧过程有重要影响。

荷电喷雾的分类方式很多,根据喷雾流量大小可以将其分为微小流量荷电喷雾与大流量荷电喷雾。微小流量荷电喷雾是由静电雾化原理<sup>[7]</sup>主导的荷电喷雾,其机制为:通过给液体喷射装置施加高电压,使得喷射装置的尖端液体形成泰勒锥并发射射流,射流表面上的波纹导致由于库仑力排斥而径向分散的小而高度带电的雾滴<sup>[8]</sup>。大流量荷电喷雾是由压力雾化原理<sup>[9]</sup>主导的荷电喷雾,其机制为:将压力转化为流体动能以形成高速运动的液柱射流或液膜射流,与周围低速的气体介质相遇,液柱或液膜在破碎力与反破碎力作用下破碎,最后完成雾化<sup>[10]</sup>。

荷电方式主要包括自然荷电和强制荷电两大类,随着各种静电技术的开发利用,对液滴的强制带电成为研究的重点<sup>[11]</sup>。强制带电方式主要包括:接触荷电,电晕荷电和感应荷电。感应荷电是根据静电感应原理使雾滴上产生与高压电极极性相反的电荷,即将外加高压电源直接加在环状电极上,通过环形电极与锥状水膜之间的电场,使液滴产生与电极极性相反的感应电荷的荷电方式。其主要优点包括:荷电结构简单,荷电稳定,荷电安全与荷电效率高。因此本文对感应荷电电荷迁移的影响因素进行相关实验与分析,以进一步提高感应荷电喷雾效果。

## 1 喷雾实验

本文采用的感应荷电喷雾实验系统如图1所示,该系统由液体工质供应系统、细水雾静电感应系统、荷质比测量系统组成。

其中,采用XWL42.15型高压柱塞泵为该系统提供压力,电源部分采用LAS-50KV-20mA型高压电源,静电感应喷雾电流测量采用网状目标法,测量仪表选用GLOW-

28520数显直流微安表。此系统关键部分为细水雾静电感应荷电装置。

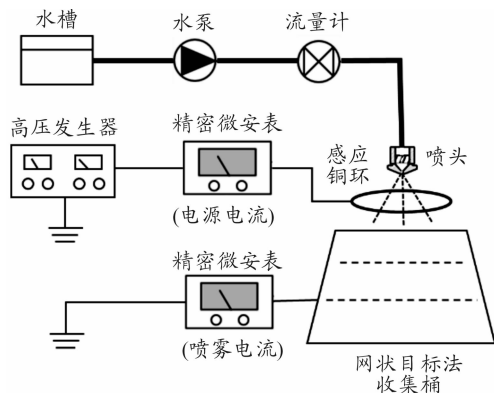


图1 感应荷电喷雾系统实验原理图

水雾具有一定的导电率,因此必须保证整个静电感应系统绝缘隔水,否则会产生漏电流,这对微量级电流测量的影响是巨大的。针对设计要求设计一种结构简单的整体式感应带电装置(如图2所示),该装置主要由伞罩、连接柱、铜环等组成,其中铜环套于伞罩上部棱台型位置,不同环径位于棱台形不同高度,伞罩下部为一个较大尺寸的平台,主要用来阻挡由于负压和电场带来的反卷喷雾,从而达到绝缘的效果。整个伞罩通过连接柱固定于喷雾系统管路,而且其高度是可调整的,这有利于探索环径和铜环到喷头端部距离对于超细水雾液滴带电量的影响。

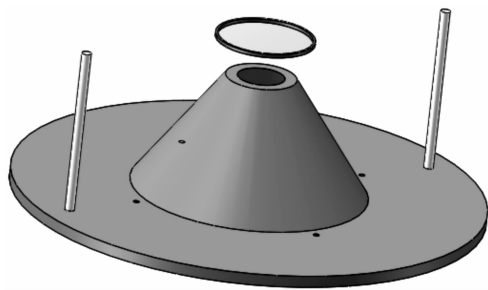


图2 细水雾静电感应装置

实验时,启动柱塞泵使得液体工质通过一定长度管路并最终经由细水雾喷头以雾滴形式喷射而出,在这个过程中同时开启高压电源,使得铜环加载相应电势,细水雾喷头感应相应电荷,喷射而出的细水雾带走一定感应电荷,当荷电雾滴运动到铜网时会沿着目标铜网—数显微安电流表—大地回路放电,此时,数显微安表示数即为细水雾感应电流,进而可以算出平均荷质比:

$$A_q = \int_0^t Idt \int_0^t md t = It/Q_t = I/Q_t \quad (1)$$

式(1)中:  $I$  为数显微安表示数;  $Q_g$  为液体工质流量。

实验时,通过改变感应带电绝缘装置材料、环形电极直

径、环形电极和喷头之间距离、液体工质流量、高压电源输出电压等,获取各种工况下的喷雾荷质比。经过充分比较,得到一定的细水雾静电感应规律。

## 2 环形电极与喷嘴间电场强度

为了方便研究,粗略地计算环形电极与喷嘴之间电场大小。假设细水雾的粒径很小,且对周围的场强影响较小,可以近似将其看成电荷完全分布于导体外表面上的实心球体,而实心球体的内部及空腔中的电场强度均为零。从喷嘴喷出的雾化锥角为 $0^\circ$ ,即喷射出的雾场呈垂直的圆柱形,环状电极的厚度忽略不计。根据高斯定理,雾滴表面的电荷密度为:

$$\sigma_m = \varepsilon_0 E \quad (2)$$

式(2)中: $\varepsilon_0$ 为真空介电常数; $E$ 为雾滴表面附近的场强。

细水雾通过两极间电场后所带的电流为:

$$I = 2\pi r \sigma_m v = 2\pi r \varepsilon_0 E v \quad (3)$$

式(3)中: $r$ 为喷嘴的出口半径; $v$ 为雾滴的流速; $Q$ 为液体流量。

而两极间被施加电压后,沿轴线上的电位分布为:

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_0^{2\pi} \frac{ndl}{c} = \frac{nR}{2\varepsilon_0 \sqrt{R^2 + z^2}} \quad (4)$$

式(4)中: $c$ 为环状电极到 $z$ 轴上任一点的距离; $R$ 为环状电极半径; $z$ 为喷嘴距感应电极铜环中心点的轴向距离; $n$ 为环状电极线电荷密度。

两极间的电场强度与电压的关系为:

$$E = \frac{U}{z} = \frac{nzR}{2\varepsilon_0 (R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (5)$$

如果环状电极至喷嘴出口的距离为 $S$ ,施加电压为 $U'$ ,则两极间的场强为:

$$E = \frac{2U'RS}{(R^2 + S^2)^{2/3}} \quad (6)$$

式(6)即为环形电极与喷嘴之间电场的简单表达式,从式中可以看出来,两极之间的电场强度与电源电压成正比,与感应带电环直径、带电环距喷嘴垂直距离成反比。

## 3 对喷雾荷质比影响的主要技术参数

### 3.1 绝缘罩材质

为了研究不同材质感应带电罩条件下,细水雾感应带电量与电源电压的关系,本文进行了不同材质感应带电罩下细水雾感应带电实验。

实验过程中,感应带电环直径为 $84\text{ mm}$ ,感应带电环与喷嘴的纵向距离为 $10\text{ cm}$ ,喷雾流量为 $5\text{ L/min}$ 。4种感应带电罩材质分别为聚四氟乙烯、尼龙、聚甲醛和PVC,四种材料的物性参数如表1所示。

表1 4种绝缘材料的物性参数

物性参数	绝缘材料			
	聚四氟乙烯	尼龙	聚甲醛	PVC
密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2.2	1.15	1.39	1.38
熔点/ $^\circ\text{C}$	327	215 ~ 225	180	185 ~ 205
拉伸强度/MPa	30	60.0	70	50 ~ 80
吸水率/%	<0.01	3.5	0.2	0.04 ~ 0.4
软化温度/ $^\circ\text{C}$	260	260 ~ 300	150	80 ~ 85
体积电阻率/ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$\geq 1\ 015$	$> 4 \times 10^{11}$	$10^{12}$	$\geq 10^9$
相对介电常数	2.1	4 ~ 5	3.7 ~ 3.9	4 ~ 9

图3对比了4种绝缘罩材质对喷雾荷质比的影响。

由图3可以看出,四种材质绝缘罩条件下细水雾荷质比均随着电源电压的增大而增大,且基本呈现线性正相关性,这表明提高电源电压有利于提高细水雾带电量,这与式(6)中感应带电环与喷嘴间电场强度关系式中显示的规律相符。在尼龙材料进行的实验中,喷雾液滴的荷质比随电压的增大急速上升,并在 $10\text{ kV}$ 左右达到了电流表的量程,因此使用尼龙材料进行感应电荷喷雾实验相比于另外三种材料,用较小的电压就可以得到最好的荷电效果。另外,由于聚四氟乙烯材料的体积电阻率明显比其他三种材料要小,因此在电压上升到 $10\text{ kV}$ 附近时,随着射流的荷质比上升,荷电喷雾与两级之间的电场使空气中的中性粒子发生电离产生新的电离子,并使电源电压升高到 $10\text{ kV}$ 附近时无法继续升高加载电压。并且,四种材质下的感应带电量在电压逐渐增大时均显现出一定的区域饱和趋势,其中,聚四氟乙烯与聚甲醛材料相对比较明显,这与这两种材料的电学性质有关。当绝缘罩为聚甲醛或PVC材料时,细水雾带电量与电源电压呈正相关,且随着电源电压的升高,细水雾带电量变化较小。在电源电压小于 $25\text{ kV}$ 时,聚甲醛绝缘罩较PVC绝缘罩,细水雾带电量略大;在电源电压高于 $25\text{ kV}$ 时,聚甲醛绝缘罩较PVC绝缘罩,细水雾带电量略小。对于聚甲醛和PVC材料的绝缘罩,电压-荷质比图像出现了交叉点,原因可能有三个:第一、是当电源电压高于 $25\text{ kV}$ 时,由于电压过高,聚甲醛材料绝缘罩发生漏电现象,使得细水雾带电量低于PVC绝缘罩;第二、实验过程中细水雾的流量不稳,使得细水雾感应带电量存在一定的波动;第三、考虑到实验环境,可能产生一些干扰信号。同时可以看出,使用尼龙材料的绝缘罩时,电流随着电压增大的速率明显快于其他三种材料,说明在相同电源电压下,尼龙材料细水雾的带电量远远高于聚甲醛和PVC材料,且随着电源电压的升高,细水雾带电量急剧升高。不仅如此,采用尼龙材料时,电流与电压的线性相关性最好,说明此时带电过程比较平稳,重复性很好。实验中采用尼龙

材料时也没有发生任何漏水和漏电现象。结果表明,尼龙材料绝缘罩更有利于细水雾感应带电。

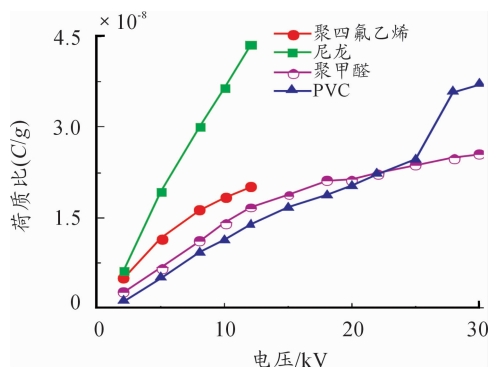


图3 绝缘罩材质对荷质比的影响

### 3.2. 环状电极直径

为了研究不同直径感应带电铜环条件下细水雾感应带电量与电源电压的关系,本文进行了不同感应带电环直径工况下细水雾感应带电的实验。图4为不同直径感应带电环对荷质比的影响。实验过程中,感应带电环与喷嘴的垂直距离为10 cm,喷雾流量为3.2 L/min。同时感应带电环直径分别为60 mm、72 mm和84 mm。

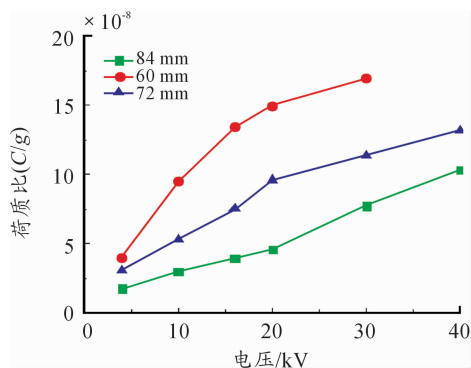


图4 感应带电环直径对荷质比的影响

由图4可以看出,在同一感应带电环直径下,感应带电量与电源电压呈正相关,细水雾感应带电量随着电源电压的增加而增加。这是由于电源电压越大,感应带电环中形成的静电场越强,在细水雾液滴穿过感应带电环的过程中,感应所带的电荷越多。在同一电源电压下,细水雾感应带电量与感应带电环直径呈负相关,即随着感应带电环直径的增大,细水雾感应带电量减小,这与式(6)得到的规律相符。对形成的电场进行简单分析可知,由于在相同电源电压下,感应带电环处电位不变,即在电通量没有变化的情况下,增大感应带电环的直径,使得内部电场减小,再由前面的分析,细水雾穿过感应带电环时所感应的电量相应减小。因此为了获得荷质比较好的荷电喷雾,在保证带电圆环不与液体射流接触的前提下,带电圆环的直径越小越好。

### 3.3 感应带电环与喷嘴间垂直距离

为了研究感应带电环与喷嘴间垂直距离对细水雾感应带电量与电源电压的关系的影响,本文进行了不同感应带电环与喷嘴垂直距离(高度)对细水雾感应带电的实验。图5为不同感应带电环垂直距离对细水雾荷质比的影响。基于前面对绝缘罩材料及带电铜环直径的影响规律的认识,实验过程中,绝缘罩采用尼龙材料,感应带电环直径为60 mm,喷雾流量为3.2 L/min。同时对五种感应带电环垂直距离下电源电压对荷质比的影响进行实验,感应带电环与喷嘴的垂直距离分别是: -10 cm、0 cm、10 cm、20 cm和30 cm,其中,当带电圆环置于喷嘴下方时,两级间距离符号为正值;当带电圆环置于喷嘴上方时,两级间距离符号为负值。

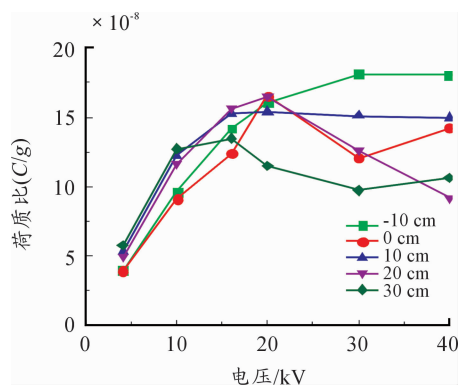


图5 感应带电环垂直距离对荷质比的影响

由图5可以看出,感应带电环的垂直距离为-10 cm即带电圆环位于喷嘴上方10 cm时得到的电压-荷质比曲线最好,说明在此感应带电环垂直距离下得到较好的荷电喷雾。当电源电压小于10 kV时,感应带电环与喷嘴的垂直距离对细水雾感应带电量的影响并不很大;而当电源电压大于10 kV时,除了带电圆环位于喷嘴上方10 cm,其他三种工况的喷雾电流荷质比随电压上升反而略微有所下降。这是由于实验中所使用的感应带电装置(图2)为锥形伞罩,带电圆环与喷嘴间的垂直距离不能直接通过带电圆环在锥形伞罩上的垂直位置的改变而改变,因此要改变带电圆环与喷嘴的垂直距离需要改变锥形伞罩的整体垂直位置,这样当带电圆环与喷嘴之间垂直距离较小甚至带电圆环位于喷嘴上方时,锥形伞罩会起到很好的隔水作用,保证带电圆环与水雾隔绝。而当两级直径增大时,锥形伞罩需要向背离喷嘴方向移动,此时会有微小液滴溅射到带电圆环上使电极导通,因此会发生有电压升高喷雾荷质比反而略有下降的现象。

在电源电压大于10 kV,垂直距离为10 cm时,细水雾感应带电量随着电源电压的增大变化并不是很明显。根据巴申定律可知:这是因为当电源电压增加到一定值,当气体成分和电极材料一定时,气体间隙击穿电压是气压和两级间距离乘积的函数。根据沈其工等<sup>[12]</sup>得到的均匀电场空气间隙的击穿电压 $U_f$ 经验公式:

$$U_f = 24.55\delta S + 6.66 \sqrt{\delta S} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{P/P_0}{(273+t)/(273+20)} \quad (8)$$

当电压上升到击穿电压  $U_f$  时,大量的自由电子被电场力加速获得足够的能量,它们将空气中的中性粒子电离,产生新的正负粒子,产生放电现象,因而细水雾的感应带电量随着电压的升高变化不大,甚至略微降低。从式(8)中可以看出,带电圆环与喷嘴之间距离越大,两级中间的空气越不容易击穿,因此当电压上升到 10 kV,极间距离为 30 cm 时荷电喷雾的荷质比变化比极间距离为 20 cm 稳定。

综上所述,电压升高到 10 kV 时,喷雾荷质比随电压的变化变得不稳定的原因是雾滴溅射到带电圆环与空气被击穿两个因素。当极间距离为 -10 cm 时,雾滴溅射所造成的影响由于锥形伞罩的保护可以忽略不计,并且由于具有高体积电阻率的锥形伞罩,两级之间的击穿电压变得很大,因此荷电喷雾荷质比在电压达到 10 kV 以上时继续缓慢上升。另外,在感应荷电装置中,将环形电极置于喷嘴上方的这种空间布置方式目前还非常少见,为感应荷电喷雾实验研究提供了新思路。

## 4 结论

1) 细水雾感应带电量与电源电压呈正相关,且尼龙材料的绝缘罩不论带电量、带电过程平稳程度还是实验安全方面,相较于其他三种材料,更有利于细水雾感应带电实验研究。

2) 细水雾感应带电量与感应带电环直径呈负相关,为了增大细水雾感应带电量应尽量减小感应带电环的直径,但也要注意由于感应带电环直径过小导致圆环容易与液滴接触导致放电。

3) 考虑到细水雾锥角、雾化和实际应用等问题,为了增大细水雾感应带电量,应将感应带电环与喷嘴的垂直距离控制在 -10 cm 左右。

## 参考文献:

- [1] 陈日,郭郭. 卤代烷灭火剂对环境的危害[J]. 山西化工, 1995(2):63-63.
- [2] 李营,浦金云,陈晓洪. 细水雾灭火技术在潜艇封舱灭火过程中的应用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011,12(4):378-382.
- [3] 余明高,李喜玲,郝强等. 细水雾灭火过程中雾卷吸影响因素的研究[J]. 火灾科学,2008,17(1):58-62.
- [4] 张瑞,周一届. 感应式静电喷头设计与试验研究[J]. 农机化研究,2013,35(1):181-183.
- [5] 伍勇辉. 喷嘴雾化特性及对电除尘性能的影响[D]. 秦皇岛:燕山大学,2012.
- [6] 应保胜,高全杰. 静电喷涂中荷电油液的雾化研究[J]. 材料保护,2003,32(10):15-17.
- [7] MARGINEAN I. From chaotic cone pulsation to ion evaporation in electrosprays[D]. Columbian College of Arts and Sciences of The George Washington University,2006.
- [8] CLOUPEAU M, PRUNET-FOCH B. Electro hydrodynamic spraying functioning modes: acritical review[J]. Journal of Aerosol Science,1994,25(6):1021-1036.
- [9] BELHADEF A, VALLET A, AMIELH M. Pressure-swirl atomization: Modeling and experimental approaches[J]. International Journal of Multiphase Flow,2012,39:13-20.
- [10] HAN Z, PARRISH S, FARRELL P V, REITZ R D. Modeling atomization processes of pressure-swirl hollow-cone fuel sprays[J]. Atomization & Sprays,1997,7(6):663-684.
- [11] 鲍重光. 静电技术原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993.
- [12] 周泽存,沈其工,方瑜. 高电压技术[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

(责任编辑 唐定国)