

周良富,张玲,薛新宇,等. 双气流道辅助静电喷头设计与试验[J]. 江苏农业科学,2017,45(24):192-196.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.24.052

双气流道辅助静电喷头设计与试验

周良富,张玲,薛新宇,秦维彩,孙竹,周晴晴,陈晨

(农业部南京农业机械化研究所,江苏南京 210014)

摘要:针对荷电雾滴在喷头处易吸附,且荷电量在射程方向上易衰减等问题,结合气流辅助喷雾与静电喷雾技术,设计双气流道辅助静电喷头。采用理论分析与公式方法,计算感应电极结构参数与位置、气流道结构与参数;采用静电喷雾试验测试喷头压力的流量特性,工作参数对荷质比的影响,雾滴的空间分布和飘移特性等。喷雾量与喷雾压力的关系为 $y = 0.3667x^{0.4673}$;在 1.0 m 以内的喷雾距离下,荷质比与喷雾压力、气流速度、感应电压呈正相关关系,喷雾距离越小荷电雾滴的荷电量衰减越剧烈。荷质比沿射程方向逐步衰减,在 0.6~1.0 m 处衰减最剧烈,而后趋于平缓;气流速度在 15、22、32 m/s 时,静电喷雾的飘移率分别降低 50.0%、22.5%、10.7%。当喷头在额定喷雾压力为 0.4 MPa、感应电压为 6 kV,采集距离在 1.0 m 以内时,静电喷雾的反面雾滴覆盖密度比非静电喷雾提高 15% 以上;当采集距离在 1.0~2.0 m 之间时,静电喷雾的反面雾滴覆盖密度提高 10% 左右;当采集距离大于 2.0 m 时,静电喷雾的反面雾滴覆盖密度反而低于非静电喷雾。因此,风送静电喷雾应用时的气流速度和喷雾高度须根据作物冠层特征选择。本研究可为喷头的应用和大型静电喷雾机的设计提供依据。

关键词:植保机械;静电喷雾;气流辅助喷雾;喷头;设计

中图分类号: S491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)24-0192-05

静电喷雾是近 50 年发展起来的一种新型施药技术,依靠荷电雾滴与作物靶标间的静电效应,使雾滴吸附在植株表面,大大增加药液的沉积量,减少农药飘移,提高农药有效利用率^[1]。静电喷雾的巨大优势使国内外学者投入了大量的研究工作,其中主要包括(1)静电喷雾基础理论与部件研究。贾卫东等运用相位多普勒粒子分析仪(phase doppler particle analyzer,简称 PDPA)研究了充电电压与雾滴粒径、速度及雾流场分布的关系^[2-3],结合扇形喷雾喷头设计了一种双平板感应式荷电装置,并在风幕式喷杆喷雾机上进行了运用和试验^[4]。Moon 等设计了一种环形感应式静电喷头,通过加载脉冲电压发现,靶标区有较大的荷电流,最高可达 27 μA ^[5]。茹煜等设计了航空双喷嘴静电喷头,分析了双喷嘴环状电极对空间电场与荷电效果的影响^[6]。根据航空静电喷头在轻型飞机上的应用特点,从静电电极、喷头材料、喷头加工工艺等方面进行了改进设计^[7-8]。(2)静电喷雾设备的研制与优化。Law 等最先研制了气流雾化静电喷头 MaxCharge^[9-10],之后美国 ESS 公司在此基础上研制了系列静电喷雾机。Pascuzzi 等利用该系列产品的 150RB14 型悬挂式静电喷雾机在葡萄园进行了系统试验^[11]。Mamidi 等在优化电极结构与位置的基础上,设计了背负式手持静电喷雾机,并在盆栽作物

上进行了试验,其雾滴覆盖率与均匀性提高了 2~3 倍^[12]。国内的何雄奎等将静电喷雾、风送喷雾和对靶喷雾相结合,研制了果园静电喷雾机^[13-14]。(3)静电喷雾参数与效果试验研究。Giles 等研究了感应电压、作业速度、靶标高度与喷雾方向对雾滴覆盖率的影响^[15]。Zhao 等采用数值分析法研究了不同雾滴粒径、荷质比和喷雾距离下雾滴的运行轨迹,结果显示,随着荷质比的增加雾滴在冠层的沉积量增加,飘移量减小,而荷质比随喷雾距离的增加而快速减小^[16]。吴春笃等研究了气助式静电喷雾对雾滴在冠层叶片背面的沉积特性,结果发现,静电电压、喷雾距离和气流速度对雾滴在叶片背面沉积有显著影响^[17]。

目前的风送静电喷雾技术研究只是把风送喷雾技术与静电喷雾技术的简单融合,没有考虑到气流与雾滴相互作用对喷头的特殊要求,导致荷电雾滴在喷头附近大量吸附,且雾滴荷电量在射程方向上快速衰减,最终造成荷电效果不理想。本研究从荷电雾滴动力学着手,分析雾滴荷电过程、荷电雾滴衰减与气流速度的关系,设计双气流道辅助静电喷头,并通过静电喷雾试验验证静电喷头的效果,为喷头的应用与机具的设计提供技术支撑。

1 双气流道辅助静电喷头结构与工作原理

1.1 双气流道辅助静电喷头的主要结构

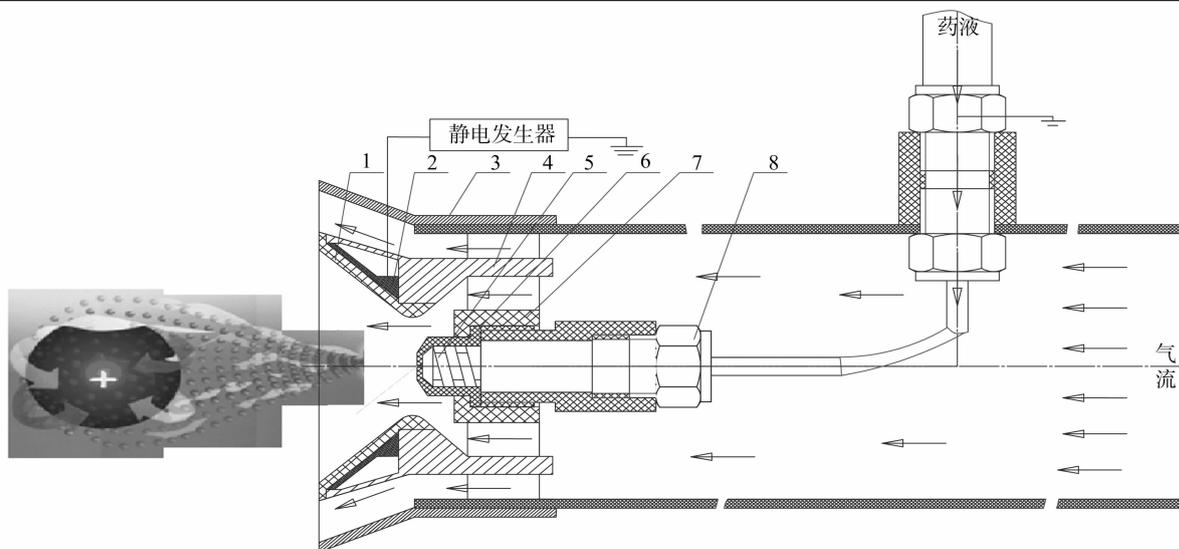
为解决荷电雾滴在电极附件上吸附和荷电量在空间内易衰减等问题,静电喷头采用双气流道辅助系统,其主要结构如图 1 所示,该结构主要包括空心圆锥雾喷嘴、感应式仿形电极、双气流道系统和连接管道等。其中感应电极置于由高绝缘环氧树脂制成的电极座内,选用 12Z802-1Y103 型高压电源,其要求输入电压为 12 V,输出电压为 0~8 000 V;喷嘴选择美国喷雾系统公司生产的 TXR800053 VK 型空心圆锥雾

收稿日期:2016-06-21

基金项目:国家自然科学基金(编号:51605235);江苏省农业自主
主创新资金[编号:CX(13)3022];公益性行业(农业)科研专项
(编号:201220025)。

作者简介:周良富(1983—),男,江西上饶人,博士,助理研究员,从事
植保机械装备与仿真技术研究。E-mail:326310253@qq.com。

通信作者:张玲,硕士,研究员,主要从事植保机械研究。E-mail:
nmmz1965@126.com。



1—绝缘层; 2—仿形电极; 3—流罩; 4—电极座; 5—过滤网; 6—喷嘴; 7—喷嘴座; 8—连接管道

图1 双气流道辅助静电喷头结构

嘴,该喷嘴的喷雾角为80°,雾滴细,适合于果园、葡萄园和特色作物的风送喷雾。

1.2 双气流道辅助静电喷头的工作原理

双气流道辅助静电喷头的工作原理为:药液在液泵工作压力的作用下进入喷嘴并雾化;在高压电源作用下(液路接地),电极与雾流之间形成高压电场,当雾化后的雾滴进入电场区后会被感应带上与电极相反的电荷,荷电后的雾滴在内流道气流作用下被快速运输到作物靶标,荷电雾滴在靶标区环绕吸附(图1),外流道气流可防治荷电雾滴在喷头处吸附沉积,从而提高农药在靶标背面的沉积量,减少农药飘移,提高农药利用率。其中静电效果与电极结构参数、气流速度和分布都有直接关系。

2 静电电极的关键结构与参数

2.1 电极结构与工作参数

静电电极的结构形式和尺寸是决定静电喷雾荷电效果的主要因素。目前大多采用的是环形电极,这种电极加工方便,但电极与雾流之间的距离不能保持一个最佳值,即在靠近喷嘴处距离过大,远离喷嘴处距离过小。距离过大影响荷电效果;距离过小容易造成荷电雾滴吸附于电极座,甚至会与雾流发生干涉,引起电流短路或电压波动,进而影响雾滴的带电效果。

本研究选用的TXR80053VK型空心圆锥喷嘴的喷雾角为80°,为使雾滴充电效果最佳,须保证电极与雾流处在最佳的相对位置,因此将电极设计成与喷雾角相一致的锥形电极。高压电源一端与电极连接,另一端与液路连接并接地,仿形电极与雾流组成电容器,并与环氧树脂和空气介质组成的绝缘电阻R并联,假定高压电源的电动势为V₀,电阻为R₁,则感应充电的等效电路见图2。当间距远小于电极尺寸时,可通过平行板电容器电容计算式计算电容C。

$$C = \frac{\epsilon S}{4k\pi L} = \frac{Q}{U} \quad (1)$$

式中:C为电容器电容,F;ε为绝缘层的介电常数,环氧树脂

的介电常数为2.5~6.0;k是与真空介电常数相关的常数;Q为感应静电电荷量,C;U为充电电压,V;S为电极表面积,m²;L为雾流和电极之间的距离,m。

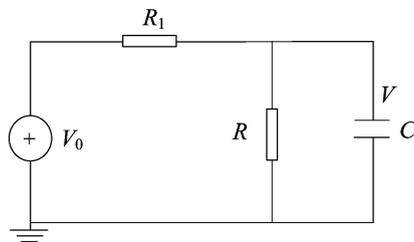
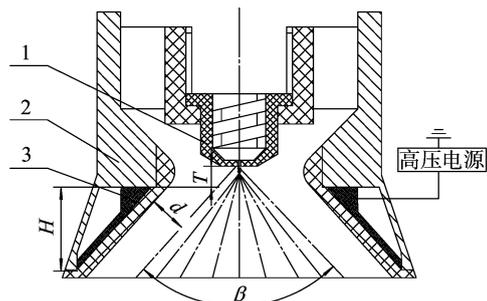


图2 感应式充电模型

由式(1)可知,电极所能带的电量与绝缘层的介电常数ε成正比;与电极感应面积S成正比;与雾流和电极之间的距离L成反比。其中电极感应面积S与喷嘴和电极的间距T、雾流与电极的间距L、电极高度H和喷雾角β相关,电极结构参数关系如图3所示,计算式如式(2)。因此T、H、L是电极设计的主要参数。

$$S = \pi \frac{(T+H)}{\cos \frac{\beta}{2}} \left[T \tan \frac{\beta}{2} + (T+H) \tan \frac{\beta}{2} + 2L \right] \quad (2)$$

其中,雾流和电极之间的距离L包括环氧树脂厚度和空气介



1—喷嘴; 2—电极座; 3—电极; T为喷嘴与电极安装位置的距离; H为电极高度; d为空气介质层厚度; β为喷雾角度

图3 电极结构参数关系示意

质厚度(d)2部分。该喷头的环氧树脂厚度设计为2 mm,空气介质厚度可通过试验方法确定,取0.3~0.6 MPa喷雾压力下的荷电雾流与电极座不发生干涉的最小空气介质厚度值,试验结果认为,以 $d=5$ mm为宜,因此 $L=7$ mm。 T 、 H 与荷电流呈正相关关系,同时 T 、 H 值受喷头外形尺寸限制,综合考虑荷电效果与喷头外形尺寸,取 $T=5$ mm, $H=10$ mm。

2.2 气流道设计

荷电雾滴在紊动气流场作用下的运动受力复杂,其中在射流方向上主要考虑气流曳力和电场力作用,为保证雾滴的荷电效果,避免电场强度和雾滴荷电量在射流方向上快速衰减,只能通过增大气流曳力将雾滴快速运输脱离电极附近的强电场区,从而使雾滴不在喷头电极处聚集。雾滴脱离强电场区后,为避免由气流速度梯度引起的雾滴荷电量衰减,设计气流速度为 $u \geq u_p$, $u' = u_p$ 。雾滴运动动力学方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + qE。$$

式中: F_D 为曳力系数; u 为内流道气流速度,m/s; u' 为外流道气流速度,m/s; u_p 为雾滴速度,m/s; q 为雾滴荷电量,C; E 为电场强度,V/m。其中雾滴速度的计算式为:

$$u_p = \frac{Q}{S}。$$

式中: Q 为喷嘴流量, m^3/s ,选用工作压力为0.4 MPa时的工作流量290 mL/min; S 为喷嘴截面积, m^2 ,选用的喷头孔直径为0.6 mm;将数据代入式可得 $u_p = 17$ m/s。

因此,为保证气流曳力做正功,要求 $u \geq 17$ m/s, $u' = 17$ m/s,但对同一气流源下的气流速度只能均等分配,因而按 $u' = u = 17$ m/s设计,内外流道风量按截面积分配计算。

$$uA_1 + u'A_2 = Q'。$$

式中: A_1 为内流道面积; A_2 为外流道面积; Q' 为风机风量,选用风机最小风量80 m^3/h ,计算并取整得流道总面积为1 307 mm^2 ,分配并取整10得内流道面积为460 mm^2 ,外流道面积为850 mm^2 。在实际工作中通过调节风量来改变气流速度。

3 静电喷雾试验

为评价气流辅助静电喷头性能,结合喷头对气流参数的要求,选用临沂亚圣机电有限公司生产的3WF-11型背负式喷雾喷粉机为原型机,通过配置喷雾系统、静电感应系统、电池动力系统和拖拉杆架研制成单管风送静电喷雾机。以此为试验平台测试气流辅助静电喷头的压力流量特性、荷质比、雾滴沉积分布与飘移性能。

3.1 喷头压力流量特性

喷头压力流量是喷头重要的性能参数,直接影响施药作业参数的选择。将喷头安装在喷头试验台上,根据JB/T 9782—2014《植物保护机械通用试验方法》测得的喷雾压力为0.2~2.2 MPa,用量筒测量1 min的喷雾量,试验结果取3次重复试验的平均值,并绘制压力流量曲线(图4)。

由图4可知,喷雾量(y)与喷雾压力(x)的关系为 $y = 0.3667x^{0.4673}$,其决定系数 $r^2 = 1$,对于没有测试点的压力流量关系也可以用上式计算。

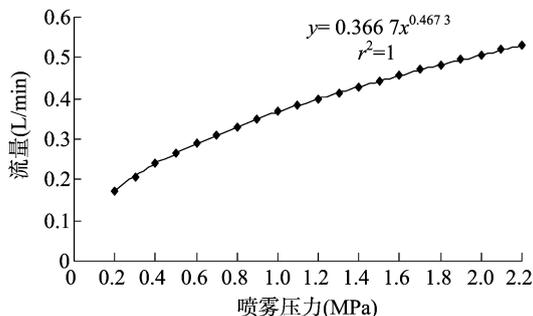


图4 喷嘴压力流量曲线

3.2 静电喷雾试验方法

3.2.1 荷质比测试方法 荷质比是雾流所带荷电量 Q 与雾流质量 m 的比值,是衡量雾流荷电效果的重要指标之一。采用法拉第筒法测试荷电量,即将气流辅助静电喷头安装于距离法拉第筒进口200 mm处的中心轴线上,内径为550 mm的法拉第筒收集所有的雾滴。采用Keysight 34410A数字万用表(量程为100 μA , $6^{1/2}$ 位读数)测定所有雾滴带电电流 I ,并记录1 min内法拉第筒流出的雾流质量。本试验主要测试不同喷雾压力、不同感应电压、不同喷雾高度、不同气流速度下在距离喷嘴出口0.2、0.6、1.0、1.4、1.8 m处的荷质比。荷质比按下式进行计算:

$$A_i = \frac{Q}{m} = \frac{It}{m}。$$

式中: I 为荷电雾滴放电电流值,A; m 为雾滴群的质量,kg; t 为测量时间,s。

3.2.2 雾滴沉积分布试验方法 试验采集点按图5所示布置,其中采集距离为4 m,采集间距为0.5 m,采集高度为1 m,每个采集距离布置A、B、C 3个采集点,每个采集点布置2张尺寸为26 mm \times 76 mm的水敏纸(瑞士先正达作物保护公司)检测正、反面雾滴的沉积量,每个距离处以3个点的平均值作为试验结果。喷头在距离地面1.1 m处以一定速度(0.5~0.8 m/s)和额定工况(充电电压为6 kV、喷雾压力为0.4 MPa、出口风速为32 m/s)喷清水,以静电与非静电2个工况分别通过采集区,待水敏纸干燥后收集纸卡于自封袋中,当天用显微相机采集雾滴覆盖图像后,采用雾滴图像处理系统测定纸卡上的雾滴覆盖密度,取3个数据的平均值作为该测试点的雾滴覆盖数(表1)。

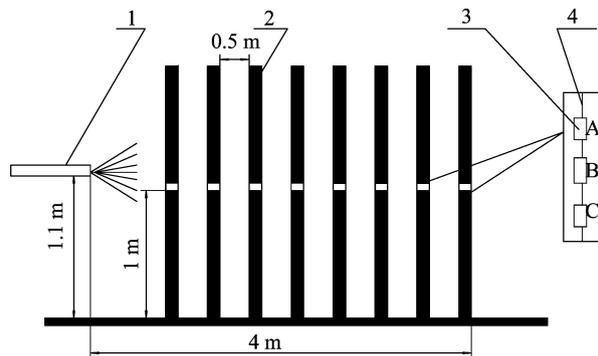


图5 雾滴沉积分布试验示意图

表1 不同距离处静电喷雾效果比较

项目	单位面积雾滴点数(个/cm ²)															
	0.5 m		1.0 m		1.5 m		2.0 m		2.5 m		3.0 m		3.5 m		4.0 m	
	正	反	正	反	正	反	正	反	正	反	正	反	正	反	正	反
静电	181	109.0	159	124	113	59.0	106	38	27	9	15	5	8	2	2.5	0.25
非静电	182	83.0	172	101	118	52.0	122	34	32	14	25	9	13	5	13.0	2.00
相对增幅(%)	-0.5	31.3	-7.6	22.8	-4.2	13.5	-13.1	11.8	-15.6	-35.7	-40.0	-44.4	-38.5	-60.0	-80.8	-87.50

3.2.3 雾滴飘移率试验方法 静电喷雾有助于减少雾滴飘移,增加雾滴在冠层的有效沉积。为考察静电喷雾对农药雾滴飘移的抑制作用,试验选用盆栽(最大冠层厚度为400 mm)为沉积对象,将喷头固定在与冠层最厚处高度(1.2 m)相同的位置上,试验装置如图6所示。在喷雾距离为1.0 m,感应电压为6 kV,喷雾高度为1 m,喷雾压力为0.4 MPa条件下,采用称质量法通过调节喷雾机油门开度测试气流速度为15、22、32 m/s时的雾滴飘移率。雾滴飘移率的计算公式为:

$$\eta = \frac{Q_p - Q_D}{Q_p} \times 100\% = \frac{Q_i \cdot t - Q_D}{Q_i \cdot t} \times 100\%$$

式中: η 为飘移率,%; Q_p 为喷头在一定时间内的总量,g; Q_i 表示喷雾压力为0.4 MPa时喷头流量, $Q_i = 290$ g/min; Q_D 为植株靶标上药液沉积量,试验时为喷雾起止时电子称上的质量变化量,g; t 为喷雾时间,本试验设为5 min。



1—静电喷雾机; 2—静电喷头; 3—冠层; 4—集雾盆; 5—电子秤
图6 雾滴沉积率测试装置

3.3 静电喷雾试验结果及分析

3.3.1 荷质比影响规律 在喷雾高度为1 m、充电电压为6 kV、出口风速为32 m/s的条件下,试验研究0.2、0.3、0.4 MPa工作压力下荷质比沿射程的衰减规律。由图7-a可知,荷质比与喷雾压力呈正相关关系;当增大喷雾压力时,相应的雾滴粒径会减小,荷电能力增强。粒径小的雾滴更容易荷电,所以雾流的荷质比随喷雾压力增大而增大。

在喷雾高度为1 m,喷雾压力为0.4 MPa、出口风速为32 m/s的条件下,试验测试了5、6、7 kV感应电压荷质比沿射程的衰减规律。由图7-b可知,在喷头出口处,荷质比与感应电压呈正相关,但由于高压感应电极所能产生的感应电场较强,在特定的辅助气流下,雾滴难以脱离强电场区,造成荷电量的衰减,所以在距离喷头出口0.6 m处,7 kV感应电压所残留的荷质比骤降。

在喷雾高度为1 m、充电电压为6 kV、喷雾压力为

0.4 MPa的条件下,试验测试了气流速度为22、32 m/s时,荷质比沿射程的衰减规律。由图7-c可知,气流速度为32 m/s时每个测试点的荷质比均高于气流速度为22 m/s的荷质比,主要是因为气流速度所产生的气流曳力加速了荷电雾滴的运输,减小了荷电量的衰减。

在充电电压为6 kV、喷雾压力为0.4 MPa、气流速度为32 m/s的条件下,试验测试了喷雾高度为0.5、1.0 m时,荷质比沿射程的衰减规律。由图7-d可知,喷雾高度为0.5 m时的荷电雾滴荷电量衰减较1.0 m时剧烈,主要是因为在一一定的气流输运下,地面对荷电雾滴具有较大的影响,离地面越近荷电量越容易衰减。

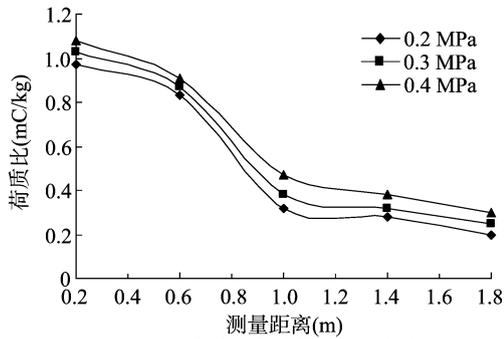
由图7可知,在距离喷头出口0.2 m处荷质比约为1.0 mC/kg,且荷质比在沿射程方向上逐步衰减,在0.6~1.0 m处衰减最剧烈,而后趋于平缓。因此在制定田间作业参数时,须根据作业需求选择喷雾距离,建议喷雾距离设在1.0 m以内,以保证荷电效果。

3.3.2 静电喷雾沉积效果分析 由表1可以看出,静电喷雾时其正面雾滴覆盖密度略小于非静电喷雾,主要是因为静电喷雾时荷电雾滴带相同性质的电荷后相互排斥,其雾滴群与非静电喷雾时相比更扩散,所以正面的雾滴覆盖密度略小。采集距离在1.0 m以内时,静电喷雾的反面雾滴覆盖密度比非静电喷雾提高15%以上;采集距离在1.5~2.0 m之间时,静电喷雾的反面雾滴覆盖密度提高10%左右;当采集距离大于2.0 m时,静电喷雾反面雾滴覆盖密度低于非静电喷雾。因为在特定的气流速度下,荷电雾滴受地面的吸附作用,难以到达较远的距离。

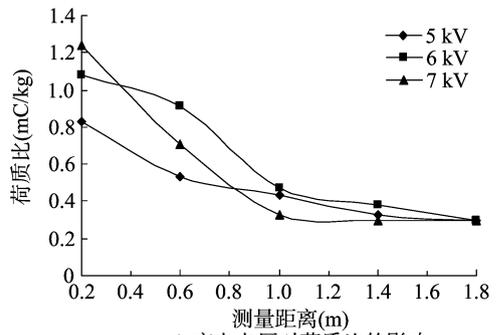
3.3.3 静电喷雾对雾滴飘移率的影响分析 由图8可知,静电喷嘴可以有效降低雾滴飘移。气流速度越大飘移越严重,气流速度为15 m/s时静电喷雾飘移率<5%;气流速度为32 m/s时静电喷雾飘移率<20%;与非静电喷雾相比,在15、22、32 m/s风速下静电喷雾的飘移率分别降低50.0%、22.5%、10.7%。

4 结论

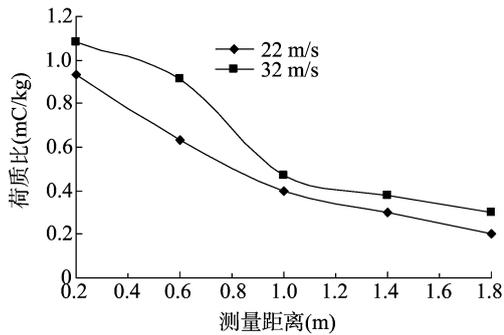
为解决荷电雾滴易吸附、易衰减等问题,设计双气流道辅助静电喷头。研究结果显示,在充电电压为6 kV、喷雾压力为0.4 MPa、气流速度为32 m/s的条件下,喷头的初始荷质比大于1.0 mC/kg。采集距离在1.0 m以内时,静电喷雾的反面雾滴覆盖密度比非静电喷雾提高15%以上,在采集距离为1.5~2.0 m之间静电喷雾的反面雾滴覆盖密度提高10%左右。气流速度在15、22、32 m/s时,静电喷雾的飘移率分别降低50.0%、22.5%和10.7%。本研究可为静电喷头的推广应用提供技术支持,同时也可为该型式喷头为部件大型喷雾机的设计提供参考。



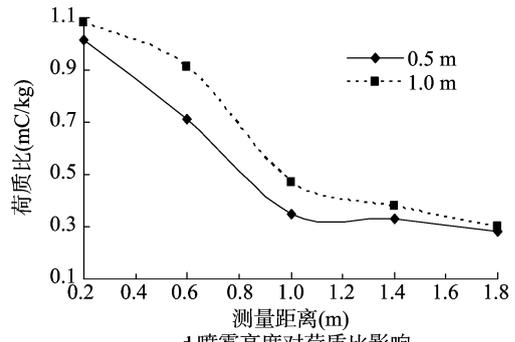
a. 喷雾压力对荷质比的影响



b. 充电电压对荷质比的影响



c. 出口风速对荷质比影响



d. 喷雾高度对荷质比影响

图7 工作参数对荷质比影响

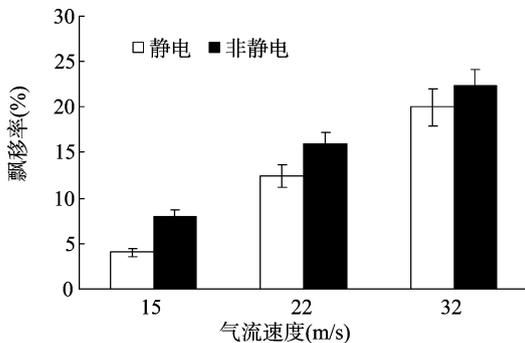


图8 静电喷雾对雾滴沉积率影响

参考文献:

[1] Law S E. Agricultural electrostatic spray application; a review of significant research and development during the 20th century [J]. *Journal of Electrostatics*, 2001, 51/52: 25-42.

[2] 贾卫东, 李萍萍, 邱白晶, 等. 农用荷电喷雾雾滴粒径与速度分布的试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 17-21.

[3] 贾卫东, 邱白晶, 施爱平, 等. 农用高压静电喷雾场的实验 [J]. *农业机械学报*, 2007, 38(12): 66-69, 88.

[4] 贾卫东, 胡化超, 陈龙, 等. 风幕式静电喷杆喷雾喷头雾化与雾滴沉积性能试验 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 53-59.

[5] Moon J D, Lee D H, Kang T G, et al. A capacitive type of electrostatic spraying nozzle [J]. *Journal of Electrostatics*, 2003, 57(3/4): 363-379.

[6] 茹煜, 郑加强, 周宏平, 等. 航空双喷嘴静电喷头的设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2007, 38(12): 58-61, 57.

[7] 周宏平, 茹煜, 舒朝然, 等. 航空静电喷雾装置的改进及效果试验 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 7-12.

[8] 茹煜, 金兰, 贾志成, 等. 无人机静电喷雾系统设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 42-47.

[9] Law S E. Electrostatic spray nozzle system; US 04004733 [P]. 1977-01-25.

[10] Law S E. Embedded - electrode electrostatic - induction spray - charging nozzle; theoretical and engineering design [J]. *Transactions of the ASAE*, 1978, 21(6): 1096-1104.

[11] Pascuzzi S, Cerruto E. Spray deposition in "tendone" vineyards when using a pneumatic electrostatic sprayer [J]. *Crop Protection*, 2015, 68: 1-11.

[12] Mamidi V R, Ghanshyam C, Kumar P M, et al. Electrostatic hand pressure knapsack spray system with enhanced performance for small scale farms [J]. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71(4): 785-790.

[13] 何雄奎, 严苛荣, 储金宇, 等. 果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 78-80.

[14] 杨洲, 牛萌萌, 李君, 等. 果园在线混药型静电喷雾机的设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 60-67.

[15] Giles D, Blewett T. Effects of conventional and reduced - volume, charged - spray application techniques on dislodgeable foliar residue of captan on Strawberries [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1991, 39(9): 1646-1651.

[16] Zhao S, Castle G S P, Adamiak K. Factors affecting deposition in electrostatic pesticide spraying [J]. *Journal of Electrostatics*, 2008, 66(11): 594-601.

[17] 吴春筠, 拾亚男, 张波, 等. 气助式静电喷雾靶标物背部沉积特性 [J]. *排灌机械*, 2009, 27(4): 242-246.