

扇形喷头球头结构建模与磨损试验*

翟恩昱 郑加强

(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

【摘要】 针对扇形喷头球头处的复杂结构以及农药中固体颗粒对喷头内表面的冲蚀情况,运用立体几何方法建立了扇形喷头基本结构尺寸的数学方程,并对其进行力学分析。结果表明,扇形喷头球头处 x 向磨损最严重。通过试验验证了理论分析,建立了时间和基本结构尺寸的变化对磨损率的影响关系式。

关键词: 扇形喷头 磨损 力学分析

中图分类号: S49; TH117.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0065-05

Spherical-top Structure Mathematical Model and Wear Experiments of Flat-fan Nozzle

Zhai Enyu Zheng Jiaqiang

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract

The complex structure on the spherical-top of flat-fan nozzle orifices and the erosion situation of solid pesticide on the inner surface of nozzle were studied. Firstly, a mathematical equation of the basic structure was established according to the solid geometry. Secondly, the most significant wear in the x -axis of the spherical-top of fan orifices was concluded through mechanical analysis. Finally, the theoretical analysis was verified through the experiments, and the wear rate relationship was established with the spraying time and the dimensional change of the spherical-top of flat-fan orifices.

Key words Flat-fan nozzle, Wear, Mechanics analysis

引言

在农药喷施机械中,喷头的质量是影响喷施药械质量的重要一环,但也是最容易忽略的一环。相对于其他部件,喷头属于易损件,在使用过程中不可避免地存在磨损。因此,准确判断喷头的磨损率可提高喷头质量、降低农药过量使用、减少环境污染。

近年来,国外对喷头的磨损展开了不少的研究。Nilars 在材料对喷头磨损的影响方面进行了研究^[1];Krishnan 等通过对喷头磨损研究认为当喷头在使用过程中压力不变时,如果其流量超过初始流量的 15%,则喷头就已经失效,并得出喷头磨损率的经验公式^[2]。这些研究都分析了影响喷头磨损

的因素,包括喷头材料、工作压力、药液特性、喷头型号和使用时间。

在我国,扇形喷头的使用非常广泛,尤其适合多种杀虫剂和除草剂的施用。而国内外对扇形喷头磨损率的判断仅根据流量经验公式,但扇形喷头的球头处结构尺寸对喷头磨损率也起着重要的作用。本文拟通过立体几何方法对扇形喷头球头处建立数学模型进行力学分析,研究扇形喷头球头处结构尺寸对磨损的影响。

1 扇形喷头球头处基本结构与磨损率分析

根据扇形喷头球头的基本结构建立坐标系,如图 1 所示。喷头球头处的受压面积 S 可利用立体几

收稿日期: 2010-12-20 修回日期: 2011-03-31

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD08A12)、国家林业局“948”项目(2007-4-20)和江苏省“六大人才高峰”资助项目(07-G-21)

作者简介: 翟恩昱,讲师,主要从事机械材料与制造工艺、现代植保机械设计理论与方法研究,E-mail: zny0001@njfu.com.cn

通讯作者: 郑加强,教授,博士生导师,主要从事智能测控与现代植保机械设计理论与方法研究,E-mail: jqzheng@njnet.nj.ac.cn

何方法求得^[3]

$$S=2\pi R^2-\frac{\alpha}{90}\pi R^2-e^2\sin\alpha=$$
$$\left(2-\frac{\alpha}{90}\right)\pi R^2-e^2\sin\alpha$$

(1)

其中 $R^2=x^2+y^2+z^2$

式中 R ——球头半径

α ——喷头出口与中心轴向夹角

e ——过心距(当切槽角顶点 O_1 在球心 O 的下方时 e 为正,反之为负)

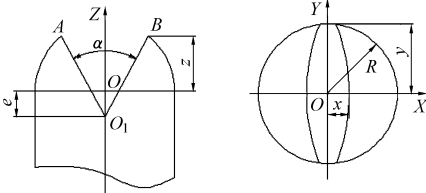


图 1 扇形喷头球头过流面积示意图

Fig. 1 Schematic of flat-fan nozzle spherical-top area

扇形喷头工作时药液在一定压力下以一定的流速通过喷头,对喷头内壁产生磨损,即冲蚀。由于药液中含有一定的固体颗粒(如生物农药),当固体颗粒直径大于 15 μm 时将加剧喷头的磨损,称为泥浆冲蚀。而农药携带固体粒子时粒子与液流的相对速度可能只有几十毫米每秒,即粒子基本上随流,因此可以通过分析液流速度和流动轨迹计算估计固体颗粒的速度和运动方向^[4]。试验证明,固体颗粒对材料表面的冲击磨损程度远远大于液滴冲蚀,因此本文主要以固体颗粒对扇形喷头球头表面的冲蚀为主进行分析。固体颗粒作用于扇形喷头内表面的压力为

$$N=pS=a\frac{p_0}{t^m}S$$

(2)

式中 p_0 ——工作压力,即喷头入口压力

p ——扇形喷头球头表面所受压力

a,m ——影响系数,与喷头的尺寸、材料和液体特性有关^[5]

t ——扇形喷头球头使用时间

压力 p 的方向垂直于喷头球头表面,如图 2 所示。并且固体颗粒对喷头的磨损主要是由其冲击的切向力 F 造成的^[6],切向力为

$$F=\mu_iN=\mu_i a\frac{p_0}{t^m}S$$

(3)

式中 μ_i ——固体颗粒和扇形喷头内表面间的摩擦因数

当携带固体颗粒的液体以一定的速度和角度冲击扇形喷头内表面时,使表面产生塑性变形,直至材料流失。因此,随着冲蚀时间的延长,材料流失也越

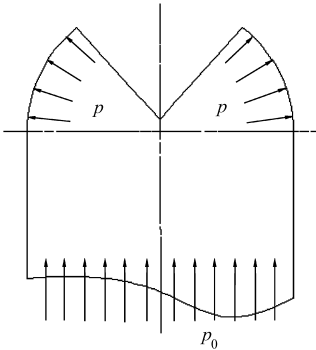


图 2 扇形喷头球头内表面压力示意图

Fig. 2 Schematic of inner surface press in flat-fan nozzle

来越多,喷头球头表面的面积也逐渐增加,切向力 F 又可表示为

$$\frac{dS}{dt}=C_1F=C_1\mu_i a\frac{p_0}{t^m}S$$

(4)

式中 C_1 ——影响系数,与药液的物理性能和喷头材料有关

随着喷头磨损,流量大约按照 $t^{0.5}$ 的幅度增加,所以影响系数 $m\neq 1$ 。为便于求解式(4),引入系数 $K=C_1\mu_i ap_0$ ^[5],再综合式(1),可得喷头尺寸变化与使用时间 t 的关系式为

$$\frac{\left(2-\frac{\alpha}{90}\right)\pi R^2-e^2\sin\alpha}{\left(2-\frac{\alpha_0}{90}\right)\pi R_0^2-e^2\sin\alpha_0}=\exp\left(\frac{K}{1-m}t^{1-m}\right)$$

(5)

其中 $R_0^2=x_0^2+y_0^2+z_0^2$

式中 x_0,y_0,z_0 ——喷头初始尺寸

R_0 ——喷头球头初始半径

α_0 ——喷头出口与中心轴向初始夹角,即 V 型槽开口角度

目前,国内外衡量喷头的磨损程度常采用经验公式^[7]

$$W=\frac{Q-Q_0}{Q_0}\times 100\%$$

(6)

式中 W ——磨损率, %

Q ——喷头磨损后的实际流量, L/min

Q_0 ——喷头磨损前的初始流量, L/min

扇形喷头球头切口面积 S_1 为^[3]

$$S_1=\frac{\alpha}{90}\pi R^2+e^2\sin\alpha$$

(7)

由流速 $v=C_2\sqrt{p_0}$ ^[5],可得

$$Q_0=C_2\sqrt{p_0}\left(\frac{\pi\alpha_0}{90}R_0^2+e^2\sin\alpha_0\right)$$

(8)

$$Q=C_2\sqrt{p_0}\left(\frac{\pi\alpha}{90}R^2+e^2\sin\alpha\right)$$

(9)

因此,磨损率 W 又可表示为

$$W = \frac{\frac{\pi}{90}(R^2\alpha - R_0^2\alpha_0) + e^2(\sin\alpha - \sin\alpha_0)}{\frac{\pi\alpha_0}{90}R_0^2 + e^2\sin\alpha_0} \tag{10}$$

根据扇形喷头球头处结构(图 1),磨损过程中喷头切口 y 的变化接近于直线,而 x 却是一段曲线,并且随着 Z 轴向外扩展。所以,扇形喷头的切口 x 和 y 的磨损程度是不一样的。Ozkan 等通过试验发现,扇形喷头经过一定时间的磨损后,其 y 的尺寸基本没有变化,但流量却明显增加。这说明扇形喷头的切口 x 的磨损程度远远大于 y 的磨损程度^[8]。因此,相对于 x 而言,扇形喷头 y 的磨损可以忽略,即 $y = y_0$ 。喷头出口与中心轴向夹角 α 可近似为 $\alpha =$

$$\frac{360x}{\pi(R+e)}, \sin\alpha = \frac{2x}{R+e}。式(10)变为$$
$$W = \frac{(2R^2 + e^2)\frac{x}{R+e} - (2R_0^2 + e^2)\frac{x_0}{R_0+e}}{(2R_0^2 + e^2)\frac{x_0}{R_0+e}} \times 100\% \tag{11}$$

联立式(5)和(6),求解方程组,又可得

$$W = \frac{(R_0+e)\left\{2\left[\pi R_0^2 - (2R^2 + e^2)\frac{2x_0}{R_0+e}\right]\exp\left(\frac{K}{1-m}t^{1-m}\right) + e^2\right\}x}{2(R+e)(2R_0^2 + e^2)\left[1 - \frac{2x_0}{\pi(R_0+e)}\right]x_0} \times 100\% \tag{12}$$

式(11)和(12)说明扇形喷头的磨损率也可以根据喷头 x 向的尺寸改变、球头内径变化或根据使用时间作为衡量标准。

2 试验验证及结果分析

为了测量喷头磨损情况,并验证式(11)和式(12)的准确性,进行试验验证。试验台参照 S471 (ASAE,2008)标准进行设计,工作原理如图 3 所示。

药液箱根据平底圆柱形搅拌式反应器模型自行设计,均布 4 块挡板。由于试验用液体至少要保证 200 L,因此选择药液箱直径为 50 cm,高度为 60 cm,挡板宽 5 cm,离槽壁 0.8 cm^[9]。即液位高度保证 50 cm。搅拌桨选用 PBSD45 型,即 45°四折叶涡轮桨。桨叶直径 17 cm,桨叶离底 17 cm^[10]。搅拌桨通过 0.75 kW 的电动机和胶带轮装置带动,叶片转速为 250 r/min,可保证磨料悬浮均匀。为了研究方便,在液体中加入磨料来提高磨损速度,磨料选用山东省临沂市金蒙碳化硅有限公司生产的碳化硅(SiC)颗粒,粒度为 800 目(约为 15 μm),磨料与液

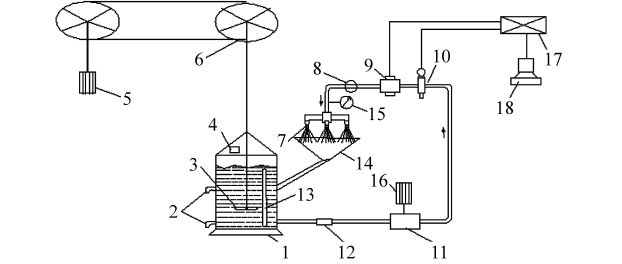


图 3 喷头冲蚀磨损试验装置工作原理示意图

Fig. 3 Schematic of nozzle wear test

1. 药液箱 2. 样品采集口 3. 搅拌桨 4. 加料口 5. 电动机
6. 胶带轮 7. 喷头架 8. 控制阀 9. 压力传感器 10. 流量传感器 11. 泵 12. 管路过滤器 13. 液位计 14. 集液箱 15. 压力表 16. 电动机 17. 测试系统 18. 上位机

体的配比约为 20 g/L,工作压力为 0.3 kPa,精度为 ±1.5%。集液箱与药液箱相通,使液体循环使用。动力装置采用上海旺泉泵业有限公司生产的 QBY-15 型气动隔膜泵。为获得试验数据的平均值,喷头架设计参照 ANSI/ASTM(美国国家标准/美国试验与材料学会标准,E641—1978),安装 3 个等距离布置的喷头。

试验用喷头为美国喷雾系统公司(Spraying Systems)的 TP11002VB 型喷头。TP11002VB 型为铜质扇形喷头,球头半径为 0.85 mm, x 为 0.95 mm, y 为 1.7 mm。工作压力为 0.3 kPa 时,标准流量为 0.79 L/min,喷雾角为 110°。但由于试验台制造误差和试验误差,本试验台测量的标准 TP11002VB 型喷头流量为 0.99 L/min。试验以 3 个喷头为一组,磨损时间从 2 h 开始,每隔 15 min 取出,测量其流量和喷孔尺寸,8 h 为最长磨损时间。总计试验了 19 组,其试验结果如表 1 所示。

由表 1 可知,磨损试验 8 h 后,TP11002VB 型喷头在 x 向的尺寸变化为 0.505 mm,而 y 向尺寸变化为 0.027 mm,半径 R 改变为 0.027 mm。图 4 为标准 TP11002VB 型喷头磨损试验 0、2、4 和 8 h 后的球头切口结构对比。随着磨损时间的延长,在喷头喷孔处,短轴磨损程度比长轴的磨损更严重。可知,相对于 x 向而言,扇形喷头 y 的磨损可以忽略的假设是成立的。

由表 1 还可知,在磨损试验初期,喷头的流量和球头处 x 尺寸改变比较大。磨损试验 3 h 后,流量与尺寸的变化趋于平缓。这可能与喷头内壁表面质量、固体颗粒的冲蚀角度以及喷头入口孔径的尺寸变化有关。

当流量超过 15% 时,TP11002VB 型喷头磨损试验时间约为 3.25 h,磨损率为

表 1 TP11002VB 型喷头磨损试验结果
Tab.1 Wear testing data of TP11002VB nozzles

时间 /h	流量 /L·min ⁻¹	球头尺寸/mm		
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>R</i>
2.00	1.10	0.507	0.850	0.850
2.50	1.12	0.523	0.862	0.862
2.75	1.12	0.532	0.863	0.863
3.00	1.13	0.538	0.863	0.863
3.25	1.14	0.543	0.865	0.865
3.50	1.14	0.551	0.868	0.868
3.75	1.15	0.563	0.869	0.869
4.00	1.16	0.603	0.869	0.869
4.25	1.15	0.613	0.869	0.869
4.50	1.16	0.655	0.870	0.870
4.75	1.16	0.667	0.870	0.870
5.50	1.18	0.848	0.873	0.873
6.00	1.18	0.871	0.874	0.874
6.50	1.20	0.954	0.875	0.875
7.50	1.24	1.009	0.877	0.877
8.00	1.24	1.012	0.877	0.877

$$W = \frac{Q - Q_0}{Q_0} \times 100\% =$$
$$\frac{1.14 - 0.99}{0.99} \times 100\% = 15.12\%$$

根据 Krishnan 等的研究结论,此时流量超过初始流量 15%,认为喷头已失效。将磨损 3.25 h 后的喷头尺寸代入式(11)中,得磨损率 $W \approx 14.92\%$ 。将磨损 3.25 h 后的喷头尺寸和时间代入式(12)中,影响系数 m 、 K 分别取 0.571 和 0.005 4^[3]。磨损率 $W \approx 14.93\%$ 。

通过计算和对比,式(11)和式(12)中喷头磨损率的理论分析与试验结果是基本符合的。

由试验数据绘制的磨损率曲线可知,其磨损率与喷头的球头尺寸和使用时间关系不是平滑曲线,与理论公式具有一定的误差。主要是由于喷头入口孔径尺寸的增加导致初始工作压力 p_0 减小,造成液流流动特性变化,致使固体颗粒的冲蚀角度和速度改变,以及理论公式推导过程中忽略了某些影响因素和试验台制造、测量误差等。因此,准确分析扇形喷头的磨损还需考虑喷头入口孔径尺寸的变化对扇形喷头球头处磨损的影响。

3 结论

- (1) 理论分析和试验结果都验证了扇形喷头球头处尺寸与磨损率具有一定的关系,其中短轴 x 受磨损的影响最严重,而长轴 y 的磨损相对于短轴可以忽略。
- (2) 当喷头材料、农药性质和工作压力确定时,磨损率与喷头的球头尺寸及使用时间有关,可根据喷头切口短轴尺寸和球头内径尺寸或根据使用时间作为判断喷头失效的标准。
- (3) 在保证喷头雾化指标前提下,增大球头半径和切深、减小切角可有效减低磨损,延长使用寿命。
- (4) 造成喷头磨损主要是由于固体颗粒对喷头内壁的切向力,而忽略了固体颗粒在法向上对喷头内壁的冲击磨损。

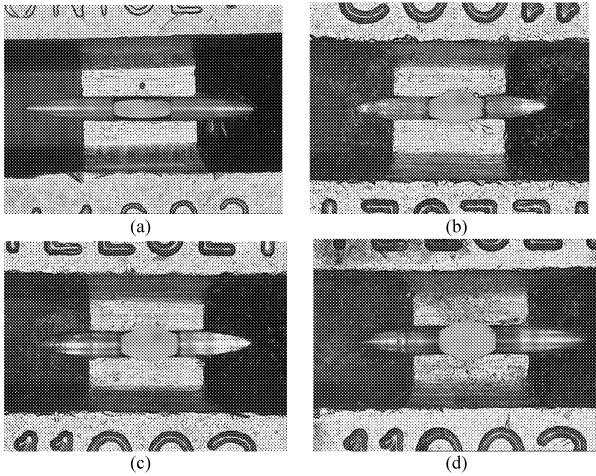


图 4 标准 TP11002VB 型喷头和不同
磨损试验时间的对比

Fig.4 Comparisons of TP11002VB nozzles in
different wear test time
(a) 0 h (b) 2 h (c) 4 h (d) 8 h

参 考 文 献

1 Nilars Mikkell. Nozzle wear[R]. Application Technology Group, Hardi International A/S.

2 Krishnan P,Evans T,Ballal K. Scanning electron microscopic studies of new and used fan nozzles for agricultural sprayers [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(2): 133 ~ 137.

3 柳平增. 喷头综合性能精密测试试验台的研制及扇形雾喷头性能研究[D]. 南京:南京农业大学,2007.
Liu Pingzeng. Design of distribution bench for precision measuring spray nozzle integrative performance and on fan spray nozzle [D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2007. (in Chinese)

4 李诗卓,董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京:机械工业出版社,1987:17 ~ 20.

5 Zhu H,Reichard D L,Ozkan H E,et al. A mathematical model to predict the wear rate of nozzles with elliptical orifices[J].

Transactions of the ASAE, 1995, 37(5): 1 297 ~ 1 303.

6 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京:冶金工业出版社,1992:454 ~ 458.

7 Reichart D L, Ozkan H E, Fox R D. Nozzle wear rates and test procedure[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(6): 2 309 ~ 2 316.

8 Ozkan H E, Ackerman K D. An automated computerized spray pattern analysis system[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1992, 8(3): 325 ~ 331.

9 王振松. 固-液搅拌槽内槽底流场的 CFD 模拟[J]. 北京化工大学学报, 2005, 32(4): 5 ~ 9.
Wang Zhensong. CFD modeling of liquid velocity in solid-liquid stirred tanks[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2005, 32(4): 5 ~ 9. (in Chinese)

10 宋海生, 谭庆昌, 王聪慧, 等. 搅拌罐内固体悬浮判据研究[J]. 工程与试验, 2009, 49(1): 11 ~ 13.
Song Haisheng, Tan Qingchang, Wang Conghui, et al. CFD simulation of criterion of solids suspension in stirred tank[J]. Engineering & Test, 2009, 49(1): 11 ~ 13. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 57 页)

5 Shaw L N. Apparatus for unloading seedlings from a tray and transporting them else where: United States, 5596938[P]. 1997-02-28.

6 耿端阳, 张铁中. 直动双挡销式分钵落苗系统设计[J]. 吉林大学学报:工学版, 2005, 35(5): 495 ~ 499.  
Geng Duanyang, Zhang Tiezhong. Design of detaching and dropping plug seedlings mechanism with straight movement and double stopping pin[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2005, 35(5): 495 ~ 499. (in Chinese)

7 李其昀, 孔卓. 分土靴式栽植器的试验与分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 70 ~ 73.  
Li Qiyun, Kong Zhuo. Simulation analysis on disjointed-soil-boots type planting apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 70 ~ 73. (in Chinese)

8 金诚谦, 吴崇友, 袁文胜. 链夹式移栽机栽植作业质量影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 196 ~ 198.

9 JB/T 10291—2001 旱地栽植机械[S]. 2001.  
JB/T 10291—2001 Transplanter of dry land plant[S]. 2001. (in Chinese)