

植保机械雾化喷头磨损规律的研究进展

翟恩显, 郑加强, 周宏平

(南京林业大学 机电学院, 江苏 南京 210037)

摘要:根据我国植保机械雾化喷头研究与使用的现状和特点,在分析喷头类型、使用及其磨损问题的基础上,分析了喷头的磨损形式及冲蚀因素,探讨了喷头材料和内部结构对磨损的影响,强化了研究雾化喷头的磨损规律对减缓喷头的磨损率,延长喷头使用时间,保证喷雾效果的重要性,提出了开展喷头失效检测和预测的思路和建议。

关键词:雾化喷头;材料;磨损;冲蚀;失效

中图分类号:S776.28

文献标识码:A

文章编号:1001-7461(2009)06-0112-05

Prospects of the Researches on Wear Mechanism of Spraying Nozzles in Plant Protection Machinery

ZHAI En-yu, ZHENG Jia-qiang, ZHOU Hong-ping

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

Abstract:Based on the introduction of the types, application and wear problems of the spraying nozzles according to the status and characteristics of the spraying nozzles of plant protection machinery in China, the wear type and erosion wear factors of the spraying nozzles were analyzed. The influences of the spraying nozzle material and its inner structure on the wear were discussed, the significance of the research of wear regularity of the spraying nozzles was reinforced in order to retard its erosion speed, prolong its lifespan and assure its effects. Finally, some proposals on the invalidation examination and forecast of the spraying nozzles were put forward and discussed.

Key words:spraying nozzles; materials; wear; erosion wear; invalidation

喷头在使用过程中,不可避免地存在磨损,而且喷头不同部位受到的液体冲击力不同,其磨损程度也不同。而磨损不仅增大了喷嘴内孔直径,也改变了喷头内部结构,必然影响雾化效果和雾滴尺寸,造成农药利用率降低、喷雾质量下降和污染环境等问题,因此,研究喷头的磨损与损坏程度是非常必要的。

喷头的损坏主要是由于过度磨损造成。其影响因素有喷雾压力、喷洒时间、农药种类与浓度、喷头材料、喷头内部结构和喷嘴形状与直径等。在美国俄亥俄州对喷雾器的调查表明^[1],大约有 1/3 的喷雾器损坏是因为喷头的过度磨损。验证喷头是否过度磨损的最好方法是将该喷嘴的流速和一个新喷嘴

的流速比较,当该喷嘴的流量超过 15% 时,就认为该喷嘴已经损坏,需要更换了。

鉴于中国国情,农民在使用喷雾器过程中,对其损坏的认可并不是以此为判断依据,即使喷嘴的流速已超过 15%,却仍在使用,忽略了雾化效果和雾滴尺寸的改变对施药效果的影响。虽然在喷头的结构设计和使用寿命上已有了较大的改进,但也相应增加了喷头的造价,农民难以接受。例如有的农民片面追求对病虫害的“致死率”,不惜以药洗茶、果、菜,成倍增加喷药量,扩大喷嘴的孔径。殊不知这种作法对提高杀伤力并无多大作用,相反改变了药滴的物理特性,药滴直径的不同大小对不同种类病虫害的针对性完全丧失,使药滴直径变大,弥漫性能变

差,附着率降低^[2]。又如在植保器械的选择上,农民往往首选价格低廉的药械,而对药械的密封性、雾化性能和杀伤效果考虑较少。容易造成价低质劣的喷头充斥市场。

1 喷头磨损的影响因素

1.1 喷头磨损形式及冲蚀因素

喷头磨损主要是冲蚀引起的。冲蚀指材料受到小而松散的流动粒子冲击时表面出现破坏的一类磨损现象,又称侵蚀磨损,即含有硬颗粒的流体相对于固体运动,使固体表面产生磨损。硬颗粒的流体几乎平行于固体表面相对运动而产生的侵蚀为磨料侵蚀;硬颗粒的流体几乎垂直于表面相对运动而产生的侵蚀为冲击侵蚀;大量冲蚀现象介于磨料侵蚀和冲击侵蚀之间。因此,衡量喷头磨损率常以冲蚀率作为评价标准。冲蚀率是指单位重量的磨粒冲击材料表面造成的重量或体积损失^[3]。

喷头的冲蚀破坏主要指流动介质环境下,由于受到固体粒子、高速液滴、气泡溃灭而出现的早期失效现象。研究冲蚀现象的目的是要从设计、材料和表面处理工艺等方面提出控制冲蚀的方法。影响冲蚀的因素有环境参数、磨粒性能和材料的硬度、热物理及机械性能等^[3]。

1.1.1 环境参数对冲蚀的影响 (1)攻角。粒子入射轨迹与表面夹角,称为攻角,有时也称为入射角。材料的冲蚀率和粒子的攻角有密切关系,可表达为:

$$\epsilon = A' \cos^2 \alpha \sin(N\alpha) + B' \sin^2 \alpha \quad (1)$$

式中: ϵ 为冲蚀率; α 为攻角; N 、 A' 、 B' 为常数,典型的脆性材料 $A'=0$;塑性材料 $B'=0$, $N=\pi/2\alpha$ 。而攻角与冲蚀率的关系几乎不随入射粒子种类、形状及速度而改变。

(2)速度。液滴冲击速度对冲蚀磨损过程有很大影响,它是决定液滴的动能、冲击瞬间的能量转换的重要参数。粒子速度对冲蚀率的影响可表达为:

$$\epsilon = \text{常数} \times v^n \quad (2)$$

式中: v 为粒子速度, n 为速度指数,其值与材料的性质有关。

实验发现,各种材料受不同攻角入射粒子冲击,其速度指数(n)大约为2.05~2.44。低攻角时 n 值小,随攻角增大而略有上升。

(3)冲蚀时间。不同的冲蚀时间,喷头的冲蚀率也不同,可以用单位时间内材料的重量损失与冲击的粒子或液滴量的比—冲蚀磨损率来表示。图1为冲蚀磨损和冲蚀磨损率($d\epsilon/dt$)的时间关系曲线^[4]。冲蚀磨损过程中,通常可分为5个阶段。阶段I为初始阶段,是冲蚀磨损的潜伏期;阶段II、阶段III和阶段IV是冲蚀磨损期,但阶段II中,冲蚀磨损增加较快,磨损率升高;随着冲蚀的进行,达到最大冲蚀磨损率,即阶段III;阶段IV中,虽然仍存在冲蚀磨损,但冲蚀磨损率已开始下降;阶段V为冲蚀磨损的持续阶段,冲蚀磨损率达到相对稳定。

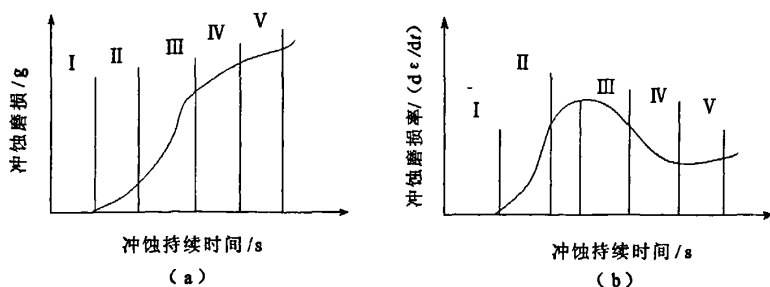


图1 冲蚀磨损、磨损率与时间的关系

Fig. 1 Relation curve of time between erosion wear and erosion wear speed

1.1.2 磨粒性能对冲蚀的影响 磨粒性能是指磨粒的粒度、形状、密度、硬度和可破碎性。本文所指的磨粒是指农药中的粒子或液滴等。磨粒粒度在20~200 μm 范围内,材料磨损率随粒度增加而上升,但当粒度增大到某一临界值,材料的磨损率几乎不变或变化十分缓慢。

磨粒的硬度可按划痕实验以莫氏硬度表示,也可以用维氏硬度表示。实验发现,粒度在125~150 μm 、速度为130 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,粒子硬度与冲蚀率之间

存在如下关系^[5]:

$$\epsilon = K \times H^{2.3} \quad (3)$$

式中: K 为比例常数, H 为磨料硬度。

磨粒的可破碎性是在冲蚀中磨粒冲击喷头内表面会发生破碎,这种破裂后的磨粒碎片将对喷头内表面产生第2次冲蚀。而磨粒破碎的磨损作用又受磨粒大小、初始冲击速度及冲击角等因素的影响。

1.1.3 材料的硬度、热物理及机械性能对冲蚀率的影响 目前,可以把材料硬度对冲蚀的影响归纳为

以下 3 点:

(1) 纯金属冲蚀率与其硬度成反比;

(2) Fe、Ni、Al 及 Ti 合金可通过热处理大幅度改变硬度,但其对冲蚀影响不大;

(3) 可淬硬钢经热处理提高硬度后,其最大冲蚀率的攻角从 30° 移向 90° 。

另外,材料的热物理性能与它们抗冲蚀性能也存在一定的关系。高速粒子冲击到金属表面时会使局部表面强烈受热,因此,要提高材料的抗冲蚀性能,应考虑材料的熔点、热容量和热导率等热物理性能。除此之外,机械作用仍然是引起局部变形和表面材料流失的主要原因,因此还必须分析冲蚀率与机械性能间的关系。

对于喷头磨损规律研究和失效预测,可通过冲蚀破坏部件的失效分析以及材料耐冲蚀性能与组织结构、力学性能之间的相互关系的研究找出一些规律,并以此来减少和控制喷头的冲蚀破坏^[6]。

1.2 喷头材料对磨损的影响

喷头材料应摩擦系数小,并具有良好的耐磨耗性、耐热性、耐腐蚀性和尺寸稳定性。

对同一型号的喷头,影响磨损的因素有喷雾压力、喷洒时间和喷头材料。而在喷雾压力不变的情况下,喷头材料起着决定性的作用。喷头材料通常有铜、不锈钢、硬质合金、陶瓷、塑料和尼龙等。表 1 为几种常用的喷嘴材料的磨损性能对比。

表 1 几种常用喷嘴材料使用寿命

Table 1 Life wear for typical nozzle materials

喷嘴材料	使用寿命
铜	较差
尼龙	一般
陶瓷	较好
不锈钢	较好
塑料	较好
硬质合金	很好

纯铜的塑性非常好,但强度、硬度较低。制造喷头所使用的铜是由锌、铅、锡、锰、镍、铅、铁、硅组成的铜合金,又称特殊黄铜,加入合金的目的是为了提高其强度、耐磨性和耐蚀性等性能,其切削加工机械性能也较突出。

陶瓷主要是氧化铝、氧化锆等耐高温氧化物或它们的固溶体。喷头材料中的陶瓷为金属陶瓷,粘接金属主要是铬、钼、钨、钛等高熔点金属。将陶瓷和粘接金属研磨混合均匀,成型后在不活泼气氛中烧结,就可制得金属陶瓷。金属陶瓷兼有金属和陶瓷的优点,密度小、硬度高、耐磨、导热性好,不会因为骤冷或骤热而脆裂。

粉末冶金是将金属粉末(或掺入部分非金属粉

末)经过成型和烧结制成金属材料或机械零件的一种工艺方法。硬质合金是由难熔金属硬质碳化物和胶结金属所组成的粉末冶金,硬质合金具有高硬度、高耐磨性和热硬性好等特点,在室温下的硬度可达 86~93 HRA。耐磨性比高速钢高 10~20 倍,有些型号的硬质合金还具有耐腐蚀、抗氧化等性能,主要缺点是抗弯强度低、韧性差、价格高。因此,常把硬质合金镶嵌使用。

不锈钢是在含碳量为 0.10%~0.45% 的钢中加入 $\geq 13\%$ Cr、0~9% Ni 和少量 Ti 等元素而炼成的钢,其特点是抗蚀性能显著提高。其中马氏体型不锈钢在淬火回火状态使用,有较高的强度、硬度和耐磨性。高硬度不锈钢的使用寿命最长,其性能也最好,但这种材料制造困难,工艺复杂,价格昂贵。一般在农林业喷头中应用较少。

工程塑料制造工艺相对简单,价格便宜,是喷头材料使用和研究中比较常用的一种材料。

Krishnaswanmy 和 Krishnan 通过实验得出与材料类型和喷雾参数有关的公式^[1]:

$$\ln(W) = -1.0372 + 0.3324 \ln(P) + 0.6008 \ln(T) - 0.72543(N_1) - 0.4155(P_1) - 0.5730(S_1) \quad (4)$$

式中:W 为磨损率(%),P 为喷雾压力(kPa),T 为喷洒时间(h), N_1 、 P_1 、 S_1 为虚拟变量(非 0 即 1)。

当喷头材料为铜时,虚拟变量全为 0;当铜的表面经过镀镍处理后, N_1 为 1,其他为 0;材料为塑料时, P_1 为 1,其他为 0;当材料为不锈钢时, S_1 为 1,其他为 0。

但是,不同型号的喷雾器所要求的喷头材料也不同。设计制造和选择喷头时,既要考虑材料的耐磨损性能,又要考虑到合理的性价比,即在满足喷雾机的各项技术指标的情况下,应选择价格便宜和容易加工的喷头制造材料。

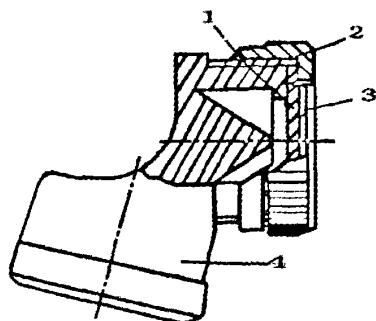
总之,对喷头的研究过程中,开发研制一种新型喷头材料,在保证喷雾效果的前提下,减缓喷头的磨损率、延长使用时间是符合节约型社会和可持续发展的技术手段。

1.3 磨损对喷头内部结构的影响

1.3.1 喷头内部形状 图 2 为农药施用典型的切向离心式圆锥雾喷头,图 3 为喷头内部形状和雾化原理图^[7]。

喷头在工作过程中,液体流线不能转折而又必须连续,由于喷头内部流道的方向、形状和尺寸的变化,当高压液体通过喷头时,会产生涡流与二次环流,这些扰动将产生能量损失并降低射流效率^[8]。因此,喷头内部流道的流通面积的变化应保持最小

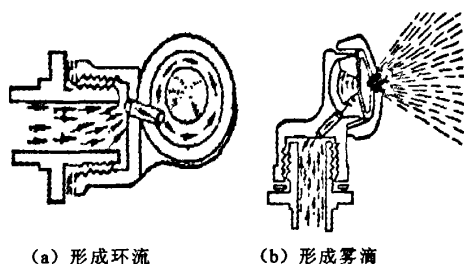
限度;其内表面的加工质量同样对射流质量产生很大影响,要确定一个相对合理的加工光洁度区间,以使喷头的能量损失减至最小,同时加工及维护成本也比较小^[8]。



1-垫片 2-喷头帽 3-喷孔片 4-喷头体

图2 切向离心式圆锥雾喷头

Fig. 2 Centrifugal cone spraying nozzle



(a) 形成环流

(b) 形成雾滴

图3 切向离心式圆锥雾喷头雾化原理

Fig. 3 Spraying principle of centrifugal cone spraying nozzle

1.3.2 磨损对喷头内部形状的影响 对于一般喷头流道,可以选取典型的截面1和2,则会有伯努利方程^[9]:

$$p_1/\rho + gz_1 + \alpha_1 v_1^2/2 = p_2/\rho + gz_2 + \alpha_2 v_2^2/2 + h_f g \quad (5)$$

式中: p_1 、 p_2 为典型截面1和2处的液体压力; v_1 、 v_2 为典型截面1和2处的平均流速; g 为重力加速度; ρ 为液体密度; h_f 为以液柱高表示的总压力损失; α_1 、 α_2 为典型截面1和2处的动能修正系数, $\alpha \approx 1$; z 为截面位置。

以上公式反映了流体流速变化与流道截面变化之间的关系,这是讨论喷嘴截面变化与流动参数变化规律的依据。

由于磨损使喷头内部流道形状和尺寸发生变化,从而改变了喷头内部流场,降低了射流效率。可通过理论分析和流场模拟实验等方法研究磨损对喷头内部流道的形状和尺寸改变最大的地方^[10]。根据该处的磨损规律,研究减小该处磨损的结构设计或对其进行局部强化。

2 喷头失效预测

所谓喷头的失效是指喷头在使用时已超出其喷雾质量指标的标准。喷头的喷雾质量指标包括覆盖率、漂移性和喷雾均匀性,当这3个指标中的一个超出标准时就认为该喷头已经失效,不能使用了。目前,依据我国国情,对喷头失效的鉴定并不是根据其喷雾质量指标,而是以喷头完全损坏作为鉴定标准。甚至有的农民为增大喷药量,故意扩大喷嘴孔径。关于喷头的失效检测和预测鉴定,可以有不同的方法。

2.1 流量测定法

在喷射压力不变的情况下,测量流量是判断喷嘴孔径变化的根据之一^[11]。流量鉴定方法是将喷嘴的流速和一个新喷嘴的流速比较,当喷嘴流量超过15%时,就认为喷嘴已损坏^[12]。但这种方法只测定了喷嘴孔径的变化,而忽视了在流量没有超过15%时,喷头内局部由于过度磨损而造成雾滴尺寸的变化。

2.2 雾滴尺寸测定法

雾滴尺寸测定法是对喷头产生的雾滴尺寸进行测量,这是准确的测量与鉴定方法,可以判定由于喷头内部结构、喷嘴直径和形状逐渐改变对喷雾性能的影响^[13]。对雾滴尺寸的测量有机械法、激光法和利用电子显微镜测量气流中微小雾滴的直径等多种方法^[14-15],但雾滴尺寸测量操作复杂,专业化程度较高,测量设备较昂贵,难以全面推广。

2.3 重量测定法

重量测定法是对喷头在使用过程中由于磨损而产生的重量变化为根据进行测定的^[16]。这种方法不仅能判断喷嘴孔径的变化,还能测定喷头内部结构的改变。方法简单,易操作,工作人员专业化要求不高,是一种可以推广的测定方法,如果能根据喷头种类,列出判定标准,则更容易被推广应用。

2.4 图像处理法

液体在通过喷头喷口处,通常先形成液膜,再由液膜裂化为液丝,最后液丝再断裂成雾滴。可通过CCD采集待试喷头的喷口图像,通过计算机处理获取喷口的形状与尺寸信息,分析喷口处液膜裂化成液丝,再断裂成雾滴的变化过程,并与数据库中的标准或规定进行比对,做出继续使用与淘汰报废的决策^[17]。但影响液膜形成和变化的因素除喷头外,还有液体的压力和液体的物理性质,如表面张力、浓度、粘度和周围的空气条件等。因此,数据库的建立具有一定的难度。

2.5 其他方法

可以通过开展喷头流体动力学和雾化理论分析,利用计算机建立喷头仿真模型,对喷头内部流场进行模拟工作,预测喷头的磨损程度和使用寿命^[18-19],为改进喷头内部的流道形状设计和对某些磨损变形大的地方进行局部强化提供依据。

3 结论

根据我国植保机械雾化喷头研究与使用的现状和特点,分析了喷头类型、使用及其磨损问题、喷头的磨损形式及冲蚀因素,探讨了喷头材料和内部结构对磨损的影响,提出了开展流量测定、雾滴尺寸测定、重量测定和图像处理等方法对喷头失效进行检测和预测鉴定的建议。

研究喷头的磨损规律,对减缓喷头的磨损率,延长喷头使用时间,保证喷雾效果具有重要意义,不仅能为喷头的失效预测提供合理的建议,对喷头材料的开发提供可靠的理论依据,更能在喷头防漂移设计上,结合我国实际情况,对喷头内部构造进行改进,如对喷头内部某些磨损变形大的地方进行局部强化,以达到控制雾滴尺寸和提高喷头使用寿命的效果。可以指导开发适合我国国情,具有价格便宜、结构简单等优点,适合特定应用对象的系列喷头。

总之,通过对喷头磨损规律的研究,能够减缓喷头的磨损率,延长喷头使用时间,保证喷雾效果,促进农林生产可持续发展。同时可为喷头制造企业选择和研究喷头材料及其加工工艺、降低制造成本提供依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 姚会春,徐幼林,郑加强,等.植保机械全寿命生态设计方法研究进展[J].*南京林业大学学报:自然科学版*,2004,28(5):99-102.
- [3] 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,1987:33-47.
- [4] 孙家枢.金属的磨损[M].北京:冶金工业出版社,1992:581-582.
- [5] TILLY G P. Erosion caused by impact of solid particles[M]//HERMAN H. *Treatise on materials science and technology*, vol. 13; D. Scott (ed), Wear. New York:Academic Press, 1979: 287-320.
- [6] 张玉萍,周永欣,吕振林.射流式冲蚀磨损试验机的研制[J].*铸造设备研究*,2006(4):9-11.
- [7] 王荣.植保机械学[M].北京:机械工业出版社,1990:119.
- [8] 何枫,谢峻石,杨京龙.喷嘴内部流道型线对射流流场的影响[J].*应用力学学报*,2001,18(4):114-119
- [9] 贺礼清.工程流体力学[M].北京:石油工业出版社,2004:82-86.
- [10] FIFE J P, DERKSEN R C, OZKAN H E. Grewal using CFD methods to predict damage of a biological pest control agent during passage through a hydraulic nozzle[R]. 2003 ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada, USA, 27-30 July 2003.
- [11] 脱云飞,杨路华,柴春岭.喷头射程理论公式与试验研究[J].*农业工程学报*,2006,22(1):23-26.
- [12] ASAE Standards. Procedure for measuring sprayer nozzle wear rate [M]. Transactions of the ASAE, 2003, 332-333.
- [13] WOMAC A R, BUI Q D. Design and tests of a variable-flow fan nozzle[J]. Transactions of the ASAE., 2002, 45(2): 287-295.
- [14] 邱景,郑加强,周宏平.雾滴尺寸测定及处理方法综述[J].*林业机械与木工设备*,1999,27(7):10-12.
- [15] 马承伟,严荷荣,袁冬顺.液力式雾化喷头雾滴直径的分布规律[J].*农业机械学报*,1999,30(1):34-39.
- [16] HUYGHEBAERT B, DEBOUCHE C, MOSTADE O. Flow rate quality of new flat fan nozzles[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(4): 769-773.
- [17] 郑加强.计算机辅助激光成像雾滴尺寸测量系统[J].*计算机自动测试与控制*,2000(6):16-17,20.
- [18] FIFE J P O, ZKAN H E, DERKSEN R C. Viability of a biological pest control agent through hydraulic nozzles [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1): 45-54.
- [19] 庄蕾,方涓.喷头内部流场模拟及结构改进[J].*流体机械*, 2002,30(7):1-2.