

大射程全射流微喷头设计与性能试验^{*}

李红 刘孟 杨炎财 郑颖

【摘要】 利用射流附壁原理,设计一种大射程的全射流微喷头。分析了全射流微喷头旋转驱动力与射流元件作用区结构尺寸的关系,得到两种驱动力的计算公式。通过正交试验得到了最优转速、最远射程时的作用区位差、作用区长度和盖板位差的尺寸组合。对最优结构样机进行了水力性能测试,测试结果与正交试验结果一致,样机水量分布均匀,射程、水滴直径达到设计要求。

关键词: 全射流微喷头 水力性能 正交试验

中图分类号: S275.5; TV131

文献标识码: A

Experimental Study on Micro Fluidic Sprinkler

Li Hong Liu Meng Yang Yancai Zheng Ying
(Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China)

Abstract

In order to enhance irrigation level, a long-range micro fluidic sprinkler was designed by adopting wall-attachment offset jet theory. The relation between rotating driving force and size of fluidic component was analyzed, and calculation formulas of two kinds of driving forces were obtained. According to the fastest rotating speed and largest range, the best geometrical size was achieved by orthogonal methodology. Hydraulic performance of the micro sprinkler was tested, and the test results were coincident with the orthogonal test results. The water distribution of the micro fluidic sprinkler is uniform, and its long range and small water drop size can meet the design requirements.

Key words Micro fluidic sprinkler, Hydraulic performance, Orthogonal test

引言

微喷头是微喷灌系统的关键设备之一,它直接关系到喷洒范围、喷洒质量和整个系统运行是否可靠。微喷头具有使用压力低、雾化程度好、喷灌强度小、适应性强等优点^[1]。常见的微喷头是折射式和旋转式,其喷洒半径大多数在5 m以内,总体技术水平偏低;常用的ZY或PY型摇臂式喷头射程在8.5 m以上;射程在5~8.5 m之间的产品欠缺。相对于常用微喷头和摇臂式喷头,大射程微喷头具有节水、节能、减少投资、改善喷洒水分分布等优点^[2],所以开发射程5 m以上的大射程微喷头具有研究价值。江苏大学应用射流附壁理论开发出PXH系列

全射流喷头,其结构简单、喷洒性能优良。本文将射流附壁理论应用于微喷头的研究,开发一种射程在5~8.5 m之间的全射流微喷头。

1 工作原理及结构特点

1.1 工作原理

射流是流体力学的一个重要研究内容,是一种特殊的流动,广泛应用于工程技术中。射流附壁效应是指一股射流以小角度紧靠平板喷出时,射流会贴附于平板流去的现象^[3-4]。

在全射流微喷头的作用区内,射流一侧有空气进入而另一侧无空气进入,在射流的卷吸作用下,两侧压差不断增大,射流向低压侧偏移并持续附壁,对

收稿日期: 2007-06-29

^{*} 国家农业科技成果转化基金资助项目(项目编号:2006GB2C100098)和江苏省自然科学基金资助项目(项目编号:BK2007706)

李红 江苏大学流体机械工程技术研究中心 研究员, 212013 镇江市

刘孟 江苏大学流体机械工程技术研究中心 硕士生

杨炎财 江苏大学流体机械工程技术研究中心 硕士生

郑颖 江苏大学流体机械工程技术研究中心 硕士生

作用区侧壁产生冲击,射流的动量发生变化。动量的变化可用附壁点模型计算,图1为射流附壁点模型示意图^[4]。

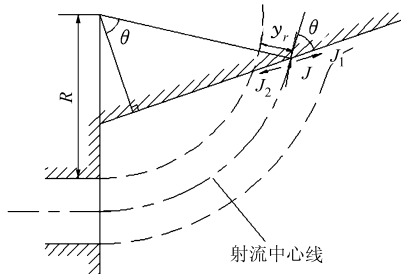


图1 附壁点模型示意图

Fig.1 Model of wall-attachment point

假设射流的动量保持不变,射流中心线流线保持喷出时的动量为 J ,射流在附壁点与侧壁发生碰撞(角度为 θ ,如图1所示),动量之间则有

$$J \cos \theta = J_1 - J_2 \quad (1)$$

式中 J ——附壁点射流的动量

J_1 ——沿侧壁向下游的流动动量

J_2 ——从附壁点回流向低压涡区的流动动量

图中,从侧壁与射流中心线延线的交点到附壁流线的垂线长度用 y_r 表示,则动量 J_1 、 J_2 分别为

$$J_1 = \int_{-y_0}^{y_r} \rho v^2 dy \quad (2)$$

$$J_2 = \int_{y_r}^{y_0} \rho v^2 dy \quad (3)$$

式中 ρ ——射流介质密度 v ——射流速度

y_0 ——附壁后流体速度为零的位置到射流中心线的距离(理论上应取无穷大,实际计算取有限值)

1.2 结构特点

WPXS型全射流微喷头主要由空心轴、下四氟垫圈、上四氟垫圈、轴套、喷体、射流元件等组成,结构见图2。全射流微喷头工作时,水流经过空心轴、喷体,最后从射流元件喷出。

射流元件既是微喷头喷洒作业的出口零件,又是微喷头转动的驱动零件。射流元件由进水喇叭口、基圆段、进气口、作用区、盖板等构成^[5],如图3所示。图中, D 为基圆段直径, B 为作用区位差, L 为作用区长度, H 为盖板位差。这些结构尺寸会对微喷头的运转产生直接影响。

2 驱动力与作用区结构尺寸的关系

全射流微喷头在旋转过程中,主要受到射流的附壁力、空气阻力、空心轴端面摩擦阻力、空心轴与轴套间摩擦阻力等作用。附壁力是微喷头转动的驱动力,直接影响全射流微喷头的正常运转。而全射

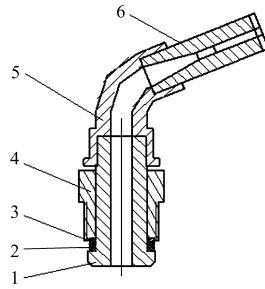


图2 全射流微喷头示意图

Fig.2 Structure of micro fluidic sprinkler

- 1.空心轴 2.下四氟垫圈
- 3.上四氟垫圈 4.轴套
- 5.喷体 6.射流元件

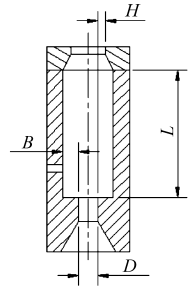


图3 射流元件结构示意图

Fig.3 Structure of fluidic component

流微喷头的驱动力产生于射流元件作用区内,作用区的结构尺寸会影响驱动力的大小。因此研究射流元件作用区结构尺寸,获得最大的驱动力,是研制全射流微喷头的重点。

2.1 驱动力的计算方法

附壁力的产生类似于射流对固定挡板的冲击,如图4所示。假定流动定常,重力不计。射流截面3-3处流动均匀,速度为 v ,射流宽度为 d ,挡板倾斜角为 α ,挡板表面积为 S_{12} 。选取固定坐标系 xOy ,控制体如图中虚线所示。截面1-1和2-2离 O 点足够远。因1-3、2-3为自由面,有 $p_1 = p_2 = p_3 = p_a$ (p_a 为大气压力)。挡板表面除 A_{12} 外均受到 p_a 作用,不受附加冲击力。于是驱动力为

$$\mathbf{R} = - \int_{S_{12}} \mathbf{P}_n dS - \int_{S_{12}} n p_a dS \quad (4)$$

式中右边第1项为射流作用于挡板上的力,第2项为没有射流时大气作用于挡板上的力。

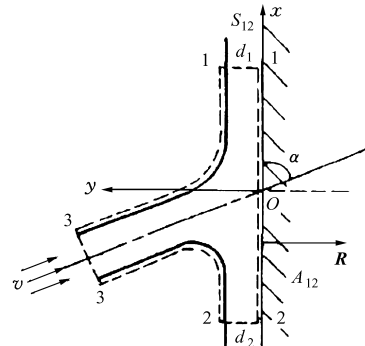


图4 射流冲击固定挡板示意图

Fig.4 Stream impacting board

由伯努利方程、连续方程和动量方程可得

$$\mathbf{R} = \rho v^2 (d_2 - d_1 + d \cos \alpha) \mathbf{i} - \rho v^2 d \sin \alpha \mathbf{j} \quad (5)$$

由理想流体假定知, \mathbf{R} 必与挡板垂直^[4],故得

$$\mathbf{R} = - \rho v^2 d \sin \alpha \mathbf{j} \quad (6)$$

2.2 作用区位差

射流由基圆段进入射流元件作用区,在压差作用下,向低压侧偏移并持续附壁,如图5所示。

附壁力为

$$R_1 = -\rho v^2 d \sin \alpha_1 j \quad (7)$$

式中 R_1 ——射流对作用区的法向冲击力

α_1 ——射流冲击角

射流中心线近似于圆弧^[4],当作用区位差增大时,射流冲击作用区侧壁的角度 α_1 也增大。由式(7)可看出, R_1 随着 $\sin \alpha_1$ 的增大而增大。也就是 R_1 随着作用区位差的增加而增大。

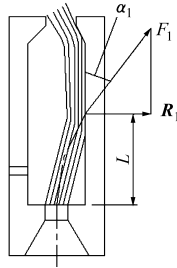


图5 射流附壁图

Fig.5 Wall-attachment offset jet

2.3 作用区长度

射流在稳定附壁时,附壁点位置确定,即图5中尺寸 L 大小不变。不同的作用区长度会影响射流在作用区侧壁附壁的效果,如图6所示。

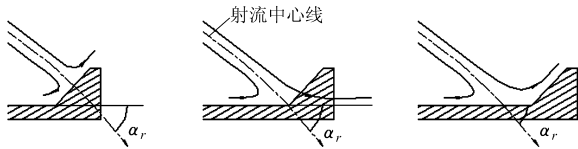


图6 作用区长度与附壁点位置

Fig.6 Cavity length and wall-attachment point

作用区比较短时,附壁点位置超出作用区范围,射流不能完全附壁。作用区较长时,射流能完全附壁,但增加了附壁点与作用区末端的距离,增大了流动损失和外形尺寸。所以作用区的合适长度需要根据实际需要确定。

2.4 盖板

射流冲击盖板时

$$R_2 = -\rho v^2 d \sin \alpha_2 j \quad (8)$$

$$R'_2 = R_2 \cos \alpha_2 = -\frac{1}{2} \rho v^2 d \sin 2\alpha_2 j \quad (9)$$

式中 R_2 ——射流对盖板的法向冲击力

R'_2 ——射流对盖板的圆周冲击力

α_2 ——射流对盖板冲击角

在试验中,受全射流微喷头本身结构要求限制,同时保证微喷头的射程与水量分布, α_2 的变化范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 。由图3、7和式(9)可看出,在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内, R'_2 随着 α_2 的增大而增大。在作用区位差大小一定时,随着 α_2 的增大,盖板位差减小。因此,射流对全射流微喷头盖板的圆周冲击力随着盖板位差的减小而增大。

3 作用区结构尺寸的正交试验

射流在作用区内的流动状况较为复杂,试验研究是探索其流动规律的主要手段^[6]。

3.1 正交试验

全射流微喷头作用区的3个关键结构参数为作用区位差 B 、作用区长度 L 和盖板位差 H 。在初步试验的基础上,对每个因素确定出3个不同的水平,因素及水平见表1,选用 $L_9(3^3)$ 安排正交试验^[7]。

表1 因素水平表

Tab.1 Factors and their levels

水平	因素		
	B/mm	L/mm	H/mm
1	1.8	15.0	0.8
2	2.0	17.5	1.0
3	2.2	20.0	1.2

正交试验在江苏大学流体机械工程技术研究中心的喷灌大厅内进行。在全射流微喷头旋转时,驱动力越大转速越高,驱动力越小转速越低,即转速的快慢间接反映了驱动力的大小,因此将转速作为试验测量值之一。试验方案和试验结果分析见表2。微喷头转速和与各因素水平的关系见图8,射程和与各因素水平的关系见图9。

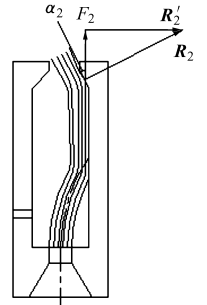


图7 射流冲击盖板

Fig.7 Stream impacting cover

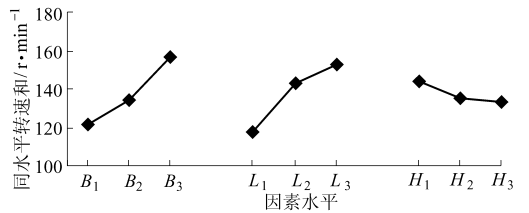


图8 转速和与因素水平关系图

Fig.8 Relation of velocity sum and factor level

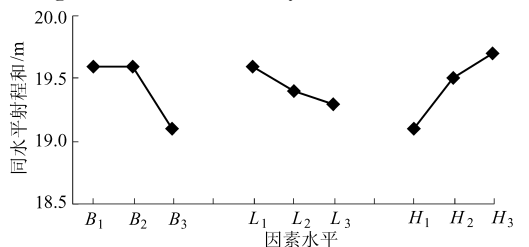


图9 射程和与因素水平关系图

Fig.9 Relation of range sum and factor level

3.2 试验结果分析

(1) 通过表2和图8、9可以看出,作用区位差、

长度、盖板位差对全射流微喷头的转速与射程均有影响。

(2) 从直观分析来看,第9号试验转速最快,附壁力最大;第6号试验次之;第1号试验效果最差。因此转速最优的组合为: $B_3L_3H_1$ 。

(3) 从直观分析来看,第1、5、7号试验射程最大,均为6.6m;第9号试验射程最小。因此射程最优的组合为: $B_1L_1H_1, B_2L_2H_3, B_1L_3H_3$ 。

表2 正交试验结果

Tab.2 Test scheme and results

试验序号	B	L	H	转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	射程/m
1	1	1	1	35.1	6.6
2	2	1	1	38.2	6.5
3	3	1	3	44.5	6.5
4	1	2	1	44.5	6.4
5	2	2	3	46.8	6.6
6	3	2	1	51.2	6.4
7	1	3	3	41.8	6.6
8	2	3	1	49.2	6.5
9	3	3	1	61.2	6.2
K_1	121.4	117.8	143.9		
K_2	134.2	142.5	135.5		
K_3	156.9	152.2	133.1		
k_1	19.6	19.6	19.1		
k_2	19.6	19.4	19.5		
k_3	19.1	19.3	19.7		
R'	35.5	34.4	10.8		
r'	0.5	0.4	0.6		

(4) 从极差分析可知,3个因素对转速影响的主次顺序为B、L、H。即对全射流微喷头转速影响最大的是作用区位差,作用区长度次之,盖板位差的影响最小。极差分析的最好组合是 $B_3L_3H_1$,即第9号试验,与直观分析的转速最优组合相同。

第9号试验由于转速最高,成为射程最小的主要影响因素,而降低转速可通过其它条件的改变,例如驱动力力臂的减小来实现,因此仍然认为最优尺寸组合是第9号组合。

参 考 文 献

- 崔毅. 农业节水灌溉技术及应用实例[M]. 北京:化学工业出版社,2005:111~148.
- 李红,刘孟,陈超. 全射流微喷头的研制[J]. 排灌机械,2007(1):38~41.
- 李世英. 喷灌喷头理论与设计[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.
- 平浚. 射流理论基础及应用[M]. 北京:宇航出版社,1995.
- 江苏大学. 全射流微喷头:中国,200610096781.4[P]. 2006-10-16.
- Alain Triboix, Danisl Marchal. Stability analysis of the mechanism of jet attachment to walls[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2002,45(13):2 769~2 775.
- 刘文卿. 实验设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005:64~75.
- 微灌水器 SL/T67.1~3—1994[M]. 北京:中国社会科学出版社,1994.

3.3 性能测试

对最优的尺寸组合 $B_3L_3H_1$ 的全射流微喷头样机进行水量分布测试。样机试验压力为额定工作压力250 kPa,测试时间1 h,水量分布曲线如图10所示。测试结果表明:水量分布均匀,喷灌强度低于黏土的允许喷灌强度8 mm/h(典型土壤特性中黏土允许喷灌强度值最低);水滴大小如图11所示,能满足不同土壤和作物的要求^[8]。

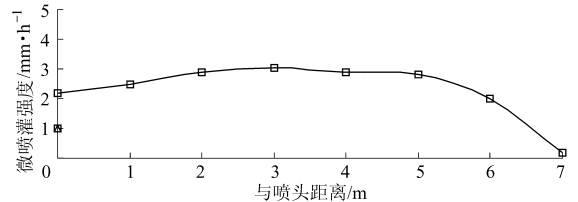


图10 全射流微喷头水量分布曲线

Fig.10 Water distribution curve of the sprinkler

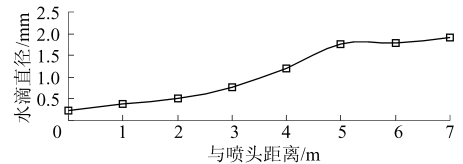


图11 全射流微喷头水滴大小曲线

Fig.11 Water drop size of the sprinkler

4 结论

(1) 将射流附壁原理应用于微喷头设计中,研制了大射程的全射流微喷头。分析了全射流微喷头旋转驱动力与射流元件作用区结构尺寸的关系,得到两种驱动力的计算公式。

(2) 利用正交试验设计方法,研究了射流元件作用区的结构尺寸对喷头运转的影响,得到转速最快及射程最远的尺寸组合。由正交试验结果可看出,对转速影响最大的是作用区位差,对转速影响最小的是盖板位差;对射程影响最大的是盖板位差,对射程影响最小的是作用区长度。这一结论有助于根据要求合理选择作用区结构尺寸。

(3) 对采用最优组合尺寸的全射流微喷头样机进行水量分布与水滴大小测试。水量分布均匀,水滴直径符合标准。