

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.014

弹性喷嘴变量喷头结构与参数模型^{*}

刘文帅¹ 韩文霆² 姚小敏¹ 崔利华¹ 张小波¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 设计了一种弹性喷嘴的变量喷头, 其喷嘴直径随压力的增大而变大, 从而降低喷头的雾化程度。为研究确定弹性喷嘴锥形角、喷嘴直径、末端圆柱段长度、弹性材料厚度和喷嘴伸出量等主要参数, 利用 ANSYS 建立了变量喷头及其内流道的三维实体模型, 采用 $k-\epsilon$ 模型在 CFX 和 ANSYS 单向流固耦合中模拟喷头弹性喷嘴在不同工作压力、不同喷嘴直径组合下的内流道流场和喷嘴的变形过程, 建立了工作压力、喷嘴直径变形和喷头流量等参数的关系模型。采用全面喷洒的方法对喷头样品进行了试验, 通过测量喷头流量和喷头工作压力等, 对模拟结果进行验证。

关键词: 变量喷头 结构设计 参数模型 流场模拟

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0080-07

Configuration Design and Parameter Model for Flexible Nozzle of Variable-rate Sprinkler

Liu Wenshuai¹ Han Wenting² Yao Xiaomin¹ Cui Lihua¹ Zhang Xiaobo¹(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: A flexible nozzle of the variable-rate sprinkler was developed. As the pressure increased, the diameter of the flexible nozzle increased and then the degree of fogging reduced. The main parameters of the nozzle, cone angle, range nozzle, length of end cylindrical section, thickness of elastic material, and extended volume of nozzle, were investigated. The 3-D solid model of the flexible variable nozzle and its internal runner were established using ANSYS software. The internal flow field of the flexible nozzle was simulated using computational fluid dynamics (CFD) software with $k-\epsilon$ model and ANSYS software with one-way fluid solid coupling model at different working pressure and different range nozzle. Relationship between working pressure, range nozzle and nozzle flow were evaluated. Simulation results were verified and precision of model was improved by measuring the displacement of the nozzle, the nozzle flow and the working pressure of the produced nozzle samples.

Key words: Variable nozzle Configuration design Parameter model Simulation of flow field

引言

人工模拟降雨喷头是人工模拟降雨系统的关键部件之一。已有的人工模拟降雨喷头由刚性的喷管和喷嘴等组成, 喷嘴安装在喷管上, 尽管不同喷头的

喷嘴有不同出口形状与尺寸, 但对于一种固定的喷头其出口截面积是固定的, 不随喷头入口压力变化而变化。一定范围内, 当压力增加时雾化程度增加, 这与自然降雨相反。国内学者对人工模拟降雨喷头结构进行了改进。党福江研究了一种双调控人工模

收稿日期: 2013-05-18 修回日期: 2013-06-07

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51079140)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B08)和高等学校学科创新引智计划资助项目(B12007)

作者简介: 刘文帅, 博士生, 主要从事节水灌溉技术与装备研究, E-mail: liuwenshuai@163.com

通讯作者: 韩文霆, 副教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术与装备研究, E-mail: hanwt2000@126.com

拟降雨喷头,提高了降雨均匀性,实现无空心喷洒^[1];舒安平研发了便携式人工降雨模拟器,实现了降雨面积和降雨强度的可调^[2];贵州师范大学开发了一种人工降雨实验装置用的降雨器,增大了雨强的调节范围^[3],但均未解决压力增加时雾化程度加剧的问题。

变量喷头可以根据喷灌需要实现喷洒域和喷洒量的可控喷洒,提高喷灌系统喷洒均匀性和对地形形状的适应性。国内外专家对变量喷头的研究主要集中在变量实现技术和结构设计方面。Robert 研制了一种仰角和转速自动调节的反作用式喷头,使喷头射程随喷头转速的变化而变化^[4]。Benjamin 研制了一种自动挡水器转速可调的叶轮驱动式喷头,实现了喷头转速和射程的同步可控^[5]。Ohayon 通过在摇臂式喷头出水口处安装流量调节阀,实现流量和压力的自动调节功能^[6]。Hunnicut 等设计了一种可以应用于多种喷头上的弧形调整阀,该阀有不同的出水口径,出水口径的大小由工作压力进行调节,实现喷头流量的自动调节^[7]。Armon 在摇臂式喷头上添加了限位挡片,通过限位挡片的位置调整,实现喷头对指定区域的喷洒^[8]。韩文霆等对国内外仿形喷洒域变量喷头和非圆形喷洒域变量喷头研究现状进行了总结,并设计了动静片调节器,通过在原有的摇臂式喷头上安装该调节器,实现了喷头射程和流量的同步调节^[9~11]。袁寿其等发明了一种异形喷嘴摇臂式喷头,实现工作压力对喷头的流量调节^[12]。韩文霆等设计了一种柔性喷嘴的降雨模拟变量喷头,实现喷洒雨滴直径随工作压力的增加而增大^[13]。

近年来,流固耦合技术在工业中得到广泛应用。Kuiken 围绕粘性液体、气体、各向同性粘弹性管、预应力管以及热动力学方面进行了一系列研究^[14~17]。Behr 等利用 EFA 法对梯形槽的波动情况进行了分析^[18];Buechignani 等利用 Laplace 方程提出了一种受水平激励下的流固耦合求解方法^[19];Yang 等利用强耦合嵌入式边界法对弹性刚体进行流固耦合求解^[20]。郑艳丽利用 ANSYS 进行三通管的传热分析^[21];袁斌利用 ANSYS 对矩形平翅片热管散热器进行了传热分析^[22];徐蕾等利用 ANSYS ICEMCFD 模块对流体的传热和流动情况进行了分析^[23]。张斌利用 ANSYS 对轴流叶片的应力进行了分析^[24];喻宇对有压管道中的水流冲击气泡问题进行了数值分析^[25];陶海亮等进行了压气机叶片的应力分析^[26];刘德有等利用 VOF 模型研究了水流对管道内滞留气泡的冲击问题^[27];廖斌等利用 NASA-VOF 模型研究了水流对丁坝的冲击问题^[28]。

本文将变量技术引入到人工模拟降雨喷头中,设计一种弹性喷嘴变量喷头结构,使其喷嘴直径随压力的增加而增加,进而降低喷头的雾化程度,并利用 ANSYS 对喷头的内流场进行数值模拟,确定喷头的参数,最终建立喷头流量、喷嘴直径和工作压力的关系模型。

1 材料与方法

1.1 弹性喷嘴变量喷头的结构

现有的人工模拟降雨喷头由刚性喷嘴和喷管组成(图 1),喷嘴通过螺纹连接到喷管上。水流通过喷嘴的小孔喷出,脱离固体边界的约束,在大气中作扩散运动,碎裂成雨滴。

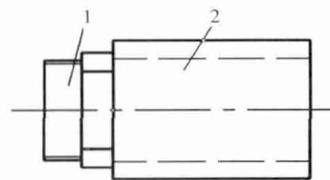


图 1 人工模拟降雨喷头

Fig. 1 Artificial simulation of rainfall nozzle

1. 刚性喷嘴 2. 喷管

弹性喷嘴变量喷头(图 2)由弹性喷嘴、外部固定件和刚性喷管组成。弹性喷嘴为锥形喷嘴,喷嘴安装在锥形固定件内,前端伸出固定件,末端通过固定件与刚性喷管螺纹连接。当喷头工作压力增加时,喷嘴出水口处压力增加,弹性喷嘴在压力的作用下喷嘴出水口径变大,降低喷头的雾化程度。

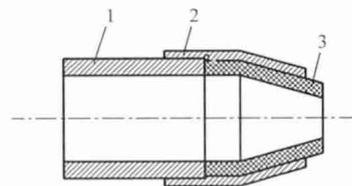


图 2 弹性喷嘴变量喷头

Fig. 2 Flexible nozzle of variable-rate sprinkler

1. 喷管 2. 固定件 3. 弹性喷嘴

1.2 ANSYS 单向流固耦合模型

1.2.1 流体动力学模型

假设水在常温下为粘性不可压缩流体,当雷诺数超过 2 300 时产生湍流,本文选用 $k-\epsilon$ 模型对喷头内流场进行 CFD 数值模拟。入口压力分别为 100、150、200、250 和 300 kPa,喷头出口压力为标准大气压,计算区域的边界假定为无滑移条件。用标准的边界方程进行近壁面处理,用分布求解的 SIMPEC 算法求解控制方程。

1.2.2 结构动力学模型

选用 100% 弹性模量为 2 MPa 的巴西橡胶作为

喷嘴材料。采用大变形求解模式和非结构四面体网格。在喷嘴处导入流体的流固耦合面压力,模拟计算喷嘴直径分别为1、2、3、4和5 mm时出水口的变形。

1.2.3 流固耦合方程

流固耦合过程中要遵循物理守恒定律,并且固体区域变形应与流体区域变形相等。

$$\tau_f n_f = \tau_s n_s \quad (1)$$

$$T_f = T_s \quad (2)$$

式中 τ ——流体与固体应力, Pa

T ——位移, m n ——向量数

下标 f 为流体,下标 s 为固体。

1.3 结构参数确定

弹性喷嘴为锥形喷嘴,图3为弹性喷嘴的剖视图。从图中可知,影响喷头结构的参数主要有喷嘴直径 D 、材料弹性模量 E 、锥形角 θ 、喷嘴材料厚度 δ 、喷嘴在固定件中伸出量 l 和喷嘴末端圆柱段长度 L 。人工模拟降雨喷头的工作压力一般为100~300 kPa,为了使水流在喷嘴处碎裂,要求喷嘴直径一般为1~5 mm。锥形喷嘴的锥形角对喷头的射程和流量有显著影响,当锥形角在20°~45°时碎裂条件较好。喷嘴在固定件中伸出量决定了喷嘴的最大变形位置和变形大小,一般喷嘴直径在1~5 mm时喷嘴最大变形在喷嘴出水口处。喷嘴末端圆柱段长度起到对水流的缓冲作用,一般在4~8 mm时可以完成缓冲。

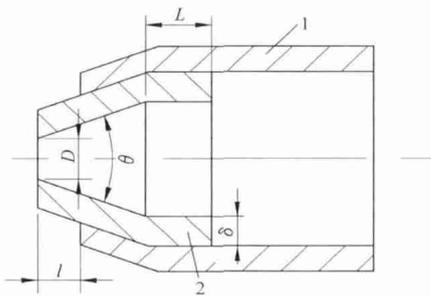


图3 弹性喷嘴剖视图

Fig.3 Flexible nozzle section view

1. 固定件 2. 弹性喷嘴

因此,初步选定喷嘴直径 D 为1、2、3、4和5 mm,角度 θ 为20°、30°和40°,喷嘴材料厚度 δ 为2、3、4和5 mm,喷嘴在固定件的伸出量 l 为2、3和4 mm和喷嘴末端圆柱段长度 L 为4、5和6 mm,弹性模量 E 为2 MPa。本文采用单一变量法确定锥形角、喷嘴材料厚度、伸出量和圆柱段长度4个参数。

以 ANSYS 确定喷嘴锥形角为例,论述喷头参数的确定方法。给定喷嘴直径2 mm、喷嘴厚度3 mm、喷嘴伸出量4 mm、末端圆柱段长度6 mm,分别建立圆锥角为20°、30°和40°的喷头三维实体结构、喷头

内流场网格和喷头结构网格。图4为 $\theta = 40^\circ$ 时,在喷头工作压力为300 kPa,喷头出口为标准大气压的条件下建立的流固耦合模型,模拟分析喷嘴出水口处变形。

在建立喷头内流场模型时,内流道为连续的曲面划分网格,对整个区域采用结构六面体网格和非结构四面体网格相结合的网格划分方法(图4b),其网格数量为21 838。

在建立喷头结构模型时,将喷头结构简化去掉螺纹结构和外部固定件,由喷嘴外部添加固定约束替代原结构(图4c),其网格数量为30 712。

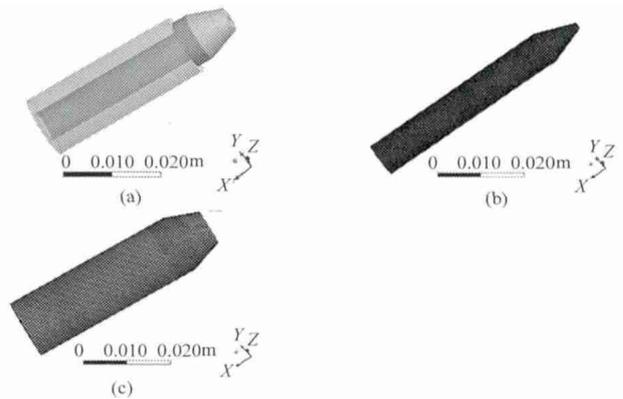


图4 弹性喷嘴变量喷头模型

Fig.4 Elastic nozzle variable nozzle model

(a) 喷头三维实体图 (b) 流体域网格 (c) 固体域网格

1.4 参数模型建立

1.4.1 理论模型

建立喷头流量与喷嘴直径变形的关系以及喷头流量与工作压力的关系,即可建立喷头流量与工作压力和喷嘴直径变形的关系。

通过模拟相同工作压力条件下,喷嘴直径为1~5 mm时的喷嘴直径变形和喷头流量变化数据,建立喷头流量与喷嘴直径变形关系为

$$Q = f_1(\Delta D) \quad (3)$$

式中 Q ——喷头流量, μ^3/h

ΔD ——喷嘴直径变形, mm

通过模拟相同喷嘴直径条件下,工作压力为100~300 kPa时的工作压力和喷头流量变化数据,建立喷头流量与工作压力关系为

$$Q = f_2(p) \quad (4)$$

式中 p ——工作压力, kPa

通过上述建立的喷头流量与喷嘴直径变形的关系及喷头流量与工作压力的关系,最终建立弹性喷嘴的流量与工作压力和喷嘴直径变形的关系为

$$Q = f_3(p, \Delta D) \quad (5)$$

1.4.2 曲线模型

模拟计算喷头在5种不同工作压力(100、150、

200、250 和 300 kPa) 和 5 种不同喷嘴直径(1、2、3、4 和 5 mm) 下的喷嘴变形及喷头流量。

在同一喷嘴直径下,建立工作压力与流量的关系。用 Excel 对工作压力与流量数据进行曲线拟合,拟合曲线采用指数、线性、对数、多项式和乘幂形式。同样的方法拟合其余 4 种喷嘴直径下的工作压力与喷头流量的关系,共得到 25 组曲线,对比曲线的相关系数确定出最优曲线,即喷头工作压力与喷头流量的关系曲线。同样的方法可以建立喷嘴变形与喷头流量的关系模型。

1.5 试验验证

1.5.1 试验材料与设备

根据模拟得到的参数,加工喷嘴直径为 2、3 和 4 mm 的弹性喷嘴,并对喷嘴的外部固定件进行加工,加工样品如图 5 所示。

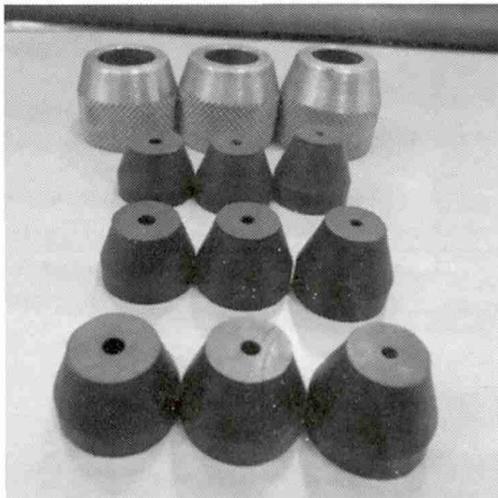


图 5 加工样品

Fig. 5 Samples

试验系统包括弹性喷嘴变量喷头、管路系统、水泵机组、智能流量计和电子压力表等,如图 6 所示。试验中通过调频将压力稳定在 200、250 和 300 kPa。系统采用 PVC 管进行连接,且密闭性良好。

1.5.2 试验条件与方案

喷头试验在中国旱区节水农业研究院的灌溉水力学大厅内进行,该试验场地长 80 m、宽 30 m,提供

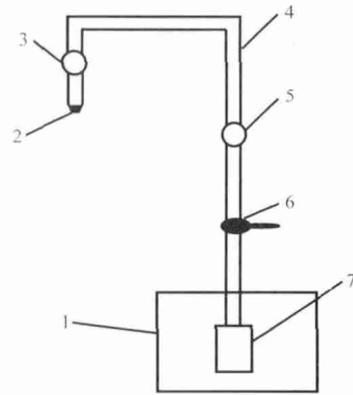


图 6 喷头喷洒试验系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of nozzle spray test system

- 1. 储水槽 2. 喷头 3. 压力表 4. PVC 管 5. 流量计 6. 阀门
- 7. 水泵

有固定压力 0 ~ 500 kPa 的调频泵及管道系统,实验室气温为 10° ~ 25°,风力 0 ~ 1 级,坡度小于 1°,试验场地如图 7 所示。进行全面喷洒试验时,对喷头的流量测 3 次后取平均值。



图 7 试验场地

Fig. 7 Test facilities

2 结果与讨论

2.1 结构参数确定

当喷嘴直径为 2 mm、喷嘴厚度为 3 mm、喷嘴伸出量为 4 mm、末端圆柱段长度为 6 mm,圆锥角为 20°、30°和 40°时弹性喷嘴变形如图 8 所示。

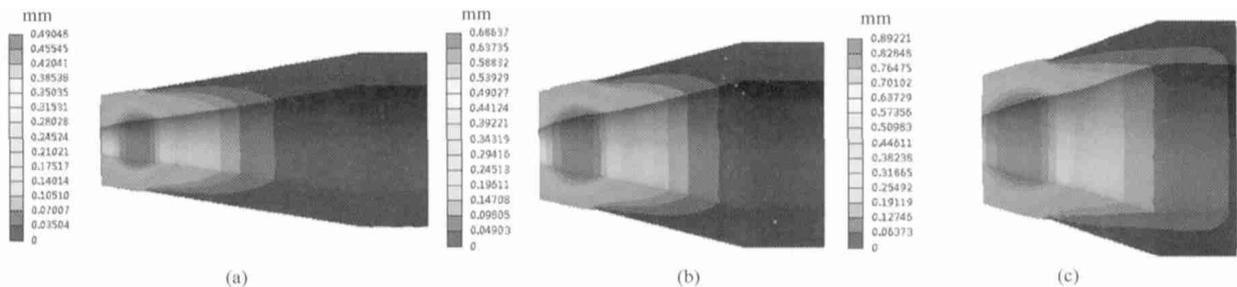


图 8 不同锥形角的喷嘴变形

Fig. 8 Different-cone angle deformation

- (a) $\theta = 20^\circ$ (b) $\theta = 30^\circ$ (c) $\theta = 40^\circ$

由图8可知,锥形角在20°~40°范围变化时,锥形角越大喷嘴最大变形逐渐增大,且最大变形位置逐渐靠近出水口处。由于锥形角为40°时喷嘴变形最大且在出水口处,因此选定40°为锥形角的最优参数。采用同样的方法确定其余的最优参数,最终确定喷嘴的参数为锥形角40°、厚度5 mm、伸出量4 mm和圆柱端长度6 mm。

2.2 关系模型建立

2.2.1 喷嘴变形与喷头流量的关系

喷头工作压力为250 kPa时得到的喷嘴变形与喷头流量,拟合曲线如图9所示。

通过各个拟合曲线比较可以发现,指数曲线拟合度最高,喷头流量与喷嘴变形之间近似符合指数关系,函数关系式为

$$Q = 0.0025e^{5.9988\Delta D} \quad (6)$$

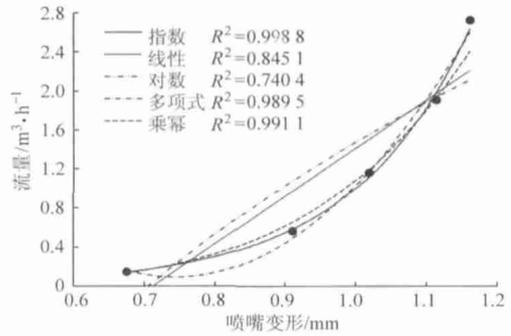


图9 喷头流量与喷嘴直径变形拟合曲线

Fig. 9 Nozzle flow and spray nozzle diameter deformation curve fitting

喷头工作压力为250 kPa、喷嘴直径为1、2、3、4和5 mm时喷嘴变形 ΔD 和流量 Q 如图10所示。由图10可知,随着喷嘴直径的增大喷嘴变形和喷头流量增大。

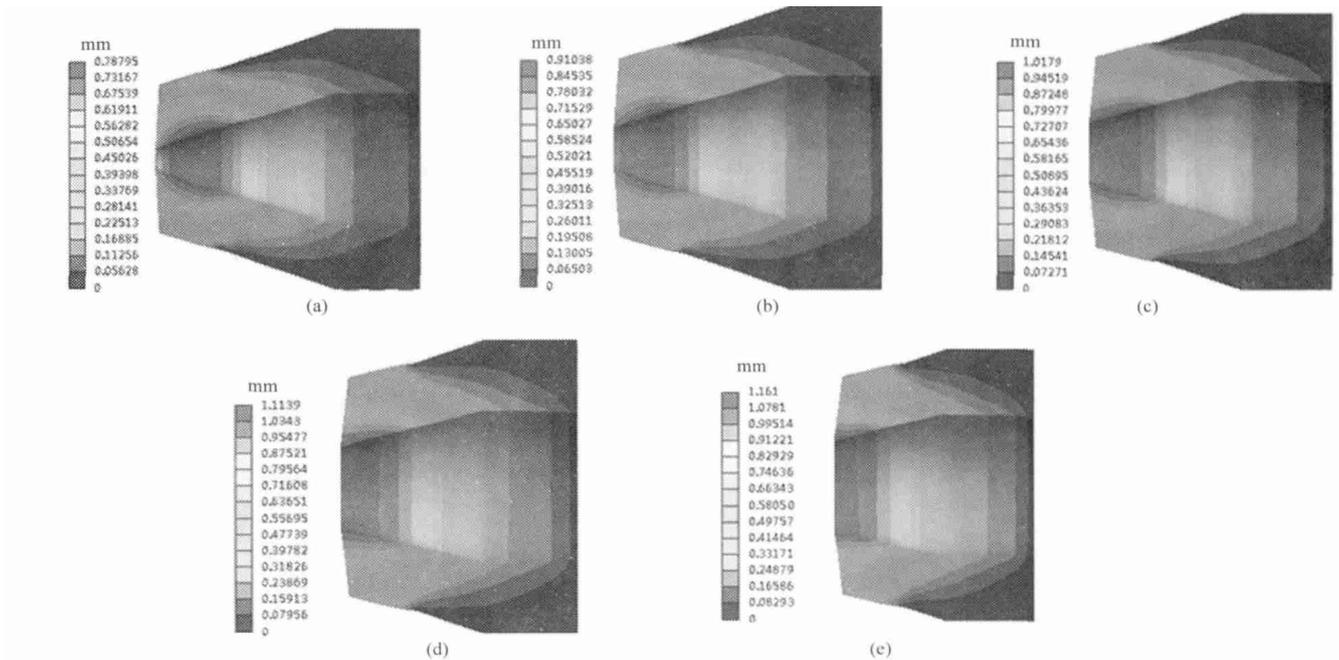


图10 不同喷嘴直径下喷嘴变形和流量

Fig. 10 Different diameter nozzle deformation and flow

- (a) $D = 1 \text{ mm}$, $\Delta D = 0.67539 \text{ mm}$, $Q = 0.14546 \text{ m}^3/\text{h}$
- (b) $D = 2 \text{ mm}$, $\Delta D = 0.91038 \text{ mm}$, $Q = 0.56204 \text{ m}^3/\text{h}$
- (c) $D = 3 \text{ mm}$, $\Delta D = 1.01790 \text{ mm}$, $Q = 1.16168 \text{ m}^3/\text{h}$
- (d) $D = 4 \text{ mm}$, $\Delta D = 1.11390 \text{ mm}$, $Q = 1.9090 \text{ m}^3/\text{h}$
- (e) $D = 5 \text{ mm}$, $\Delta D = 1.16100 \text{ mm}$, $Q = 2.72435 \text{ m}^3/\text{h}$

2.2.2 工作压力与流量关系

喷嘴直径为4 mm时得到的工作压力与喷头流量拟合曲线如图11所示。

由图11可知,喷头流量与喷头工作压力的关系更趋近于二次多项式,该二次多项式为

$$Q = 1 \times 10^{-5}p^2 + 0.0029p + 0.3776 \quad (7)$$

由式(6)、(7)得喷头流量、喷嘴直径变形和喷头工作压力三者的关系式为

$$Q = 5 \times 10^{-4}p^2 + 0.00145p + 0.00125e^{5.9988\Delta D} + 0.1888 \quad (8)$$

当喷嘴直径为4 mm、工作压力为100、150、200、250和300 kPa时喷嘴变形 ΔD 和流量 Q 如图12所示。由图12可知,随工作压力的增加喷嘴变形和喷头流量增加。

2.3 试验结果验证

将模拟流量与试验流量进行对比,模拟结果的误差如表1所示。

由表1可知,同一喷嘴直径下随着工作压力的增加模拟误差增大;同一工作压力下随喷嘴直径的增大误差增大;即随着喷嘴变形的增大误差逐渐增

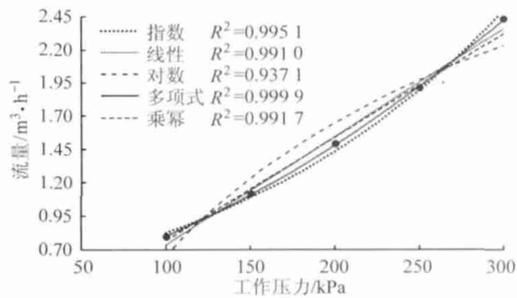


图 11 喷头流量与不同工作压力的拟合曲线

Fig. 11 Nozzle flow with different working pressure

大。但试验数据与模拟数据的误差为 13% 以内, 在规定误差范围内, 所以建立的喷头流量、喷嘴直径变形量和工作压力关系模型可靠。

3 结论

(1) 为提高人工模拟降雨系统对自然降雨的仿真度, 本文设计了一种弹性喷嘴的变量喷头, 在一定的工作压力范围内其喷嘴直径随压力的增加而增加。

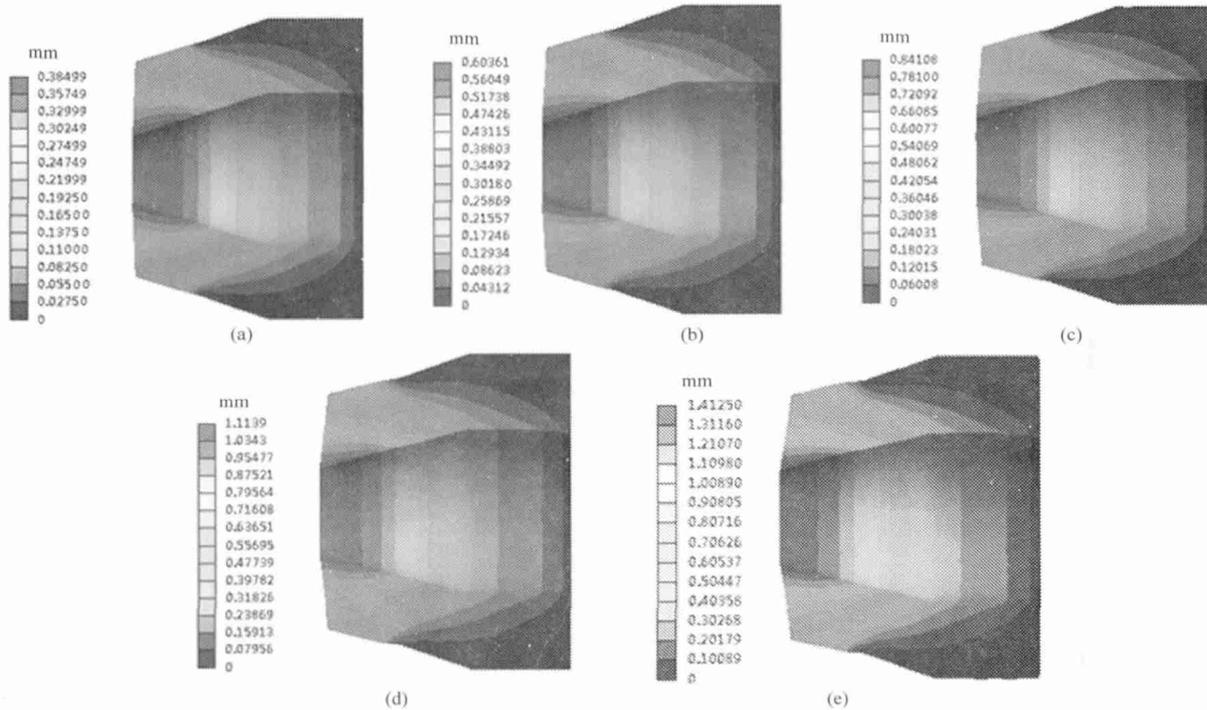


图 12 不同工作压力下喷嘴变形

Fig. 12 Deformation under different working pressure nozzle

- (a) $p = 100 \text{ kPa}$, $\Delta D = 0.38499 \text{ mm}$, $Q = 0.79705 \text{ m}^3/\text{h}$
- (b) $p = 150 \text{ kPa}$, $\Delta D = 0.60361 \text{ mm}$, $Q = 1.11172 \text{ m}^3/\text{h}$
- (c) $p = 200 \text{ kPa}$, $\Delta D = 0.84108 \text{ mm}$, $Q = 1.48899 \text{ m}^3/\text{h}$
- (d) $p = 250 \text{ kPa}$, $\Delta D = 1.11390 \text{ mm}$, $Q = 1.90899 \text{ m}^3/\text{h}$
- (e) $p = 300 \text{ kPa}$, $\Delta D = 1.41250 \text{ mm}$, $Q = 2.43004 \text{ m}^3/\text{h}$

表 1 试验结果与模拟结果对比

Tab. 1 Comparison of experimental results and simulation results

喷嘴直径/mm	工作压力/kPa	模拟流量平均值/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	试验流量平均值/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	相对误差/%
2	200	0.433	0.413	4.788
	250	0.517	0.483	7.131
	300	0.605	0.560	8.121
3	200	0.722	0.688	4.978
	250	0.855	0.795	7.547
	300	0.980	0.904	8.430
4	200	1.082	1.022	5.893
	250	1.316	1.220	7.867
	300	1.622	1.441	12.591

(2) 建立了变量喷头及其内流道的三维实体模型, 通过对内流道流场和喷嘴变形过程的模拟, 建立了工作压力、喷嘴直径变形和喷头流量三者的关系模型, 确定了弹性喷嘴的参数为锥形角 40° 、材料厚度 5 mm 、伸出量 4 mm 和圆柱端长度 6 mm 。模拟结果表明, 喷嘴变形与喷头流量呈指数函数关系, 喷头流量与喷头的工作压力呈二次多项式关系。

(3) 采用全面喷洒试验的方法对喷头样品进行试验, 通过测量喷头流量和喷头工作压力, 对模拟结果进行误差分析。结果表明, 试验数据与模拟数据的误差随喷嘴直径变形的增加而增加, 但误差在 13% 以内, 模型可靠。

参 考 文 献

- 1 党福江. 双调控人工模拟降雨喷头: 中国, CN2928264 [P]. 2006-03-23.
- 2 舒安平. 便携式人工降雨模拟装置: 中国, CN101585024 [P]. 2009-06-25.
- 3 贵州师范大学. 一种人工降雨实验装置用的降雨器: 中国, CN201692902U [P]. 2010-07-08.
- 4 Robet E. Automatic water sprinkler for irregular areas: United States, US3952954 [P]. 1976-04-27.
- 5 Benjamin F, Rabitsch. Irrigation sprinkler: United States, US4277029A [P]. 1981-07-07.
- 6 Ohayon S. Automatic adjustable sprinkler for precision irrigation: United States, US6079637 [P]. 2000-06-27.
- 7 Humnicutt S B, Samuel C W. Sprinkler with variable arc and flow rate and method: United States, US8272583 B2 [P]. 2009-05-29.
- 8 Gal I, Armon E, Bartal R, et al. Sprinkler: United States, US20110132997 A1 [P]. 2009-07-28.
- 9 韩文霆 陈香维 牛文全 等. 射程和流量同步可控的双变量精确灌溉喷头: 中国, CN1907574 [P]. 2006-08-11.
- 10 韩文霆 吴普特 冯浩 等. 仿形喷洒变量施水精确灌溉技术研究进展 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 16~19.
Han Wenting, Wu Pute, Feng Hao, et al. Review on irrigated area profile modeling and variable-rate precision sprinkle irrigation technique [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 16~19. (in Chinese)
- 11 韩文霆 吴普特 冯浩 等. 非圆形喷洒域变量施水精确灌溉喷头综述 [J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 220~224.
Han Wenting, Wu Pute, Feng Hao, et al. Variable-rate sprinklers for precision irrigation on irregular boundary area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 220~224. (in Chinese)
- 12 袁寿其 李红 刘俊萍 等. 一种摇臂式出口喷嘴调节装置: 中国, CN101716564A [P]. 2009-11-24.
- 13 韩文霆 吴普特 刘文帅. 一种柔性喷嘴的降雨模拟变量喷头: 中国, CN102179322A [P]. 2011-05-13.
- 14 Kuiken G C. Approximate dispersion equations for thin walled liquid-filled tubes [J]. Applied Scientific Research, 1984, 41(1): 37~53.
- 15 Kuiken G C. Wave propagation in fluid line [J]. Applied Scientific Research, 1984, 41(1): 69~91.
- 16 Kuiken G C. Wave propagation in a thin-walled liquid-filled initially stressed tube [J]. Applied Scientific Research, 1984, 41(1): 289~308.
- 17 Kuiken G C. Amplification of pressure fluctuations due to fluid-structure interaction [J]. Journal of Fluids and Structures, 1988, 2(5): 425~435.
- 18 Behr M, Abraham F. Free-surface flow simulations in the presence of inclined walls [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineer, 2002, 191(47~48): 5467~5548.
- 19 Edoardo B, Fulvio S, Fabio P. A partition method for the solution of a coupled liquid-structure interaction problem [J]. Applied Numerical Mathematics, 2004, 51(4): 463~475.
- 20 Yang J, Preidikman S, Balaras E. A strongly coupled, embedded-boundary method for fluid-structure interactions of elastically mounted rigid bodies [J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24(2): 167~182.
- 21 郑艳丽. 三通管液压胀形的数值模拟 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
Zheng Yanli. The numerical simulation of the teerube's hydroforming [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)
- 22 袁斌. 矩形平翅片热管散热器的传热分析和数值模拟 [D]. 镇江: 江苏大学, 2006.
Yuan Bin. Heat transfer analysis and numerical simulation on heat pipe radiator with rectangular fins [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2006. (in Chinese)
- 23 许蕾 罗会信. 基于 ANSYS ICEM CFD 和 CFX 数值仿真技术 [J]. 机械工程师, 2008(12): 65~66.
Xu Lei, Luo Huixin. The technology of numerical simulation based on ANSYS ICEM CFD and CFX software [J]. Mechanical Engineer, 2008(12): 65~66. (in Chinese)
- 24 张斌. 轴流泵叶片应力分析 [D]. 扬州: 扬州大学, 2005.
Zhang Bin. The analysis of axial flow pump blade inner stress [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2005. (in Chinese)
- 25 喻宇. 有压管道水流冲击气团的局部三维流场数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Yu Yu. Study on numerical simulation of local three-dimensional flow fields with entrapped air pockets in pressured pipelines [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- 26 陶海亮 朱阳历 郭宝亭 等. 压气机叶片流固耦合数值计算 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 1054~1060.
Tao Hailiang, Zhu Yangli, Guo Baoting, et al. Numerical simulation of aeroelastic response in compressor based on fluid-structure coupling [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 1054~1060. (in Chinese)
- 27 刘德有 周领 索丽生 等. 水流冲击管道内滞留气团现象的 VOF 模型仿真分析 [J]. 计算力学学报, 2009, 26(3): 390~394.
Liu Deyou, Zhou Ling, Suo Lisheng, et al. Simulation and analysis of the rapid filling in pipeline containing trapped air mass with VOF models [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(3): 390~394. (in Chinese)
- 28 廖斌 陈善群. 基于 NASA-VOF 模型的二维溃坝水流冲击丁坝流场模拟 [J]. 安徽工程大学学报, 2012, 27(4): 65~69.
Liao Bin, Chen Shanqun. Numerical simulation of the collapse of two-dimensional dam-break flow with a dike based on NASA-VOF model [J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2012, 27(4): 65~69. (in Chinese)