

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.010

摇臂式喷头圆射流初级碎裂数值模拟与实验^{*}

韩文霆^{1,2} 索文浩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. 中科院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探明摇臂式喷头射流碎裂机理, 基于 VOF 多相流模型理论, 采用计算流体力学 (CFD) 分析软件 Fluent, 在 200 ~ 600 kPa 的中低压条件下, 使用几何重建 (Geometry reconstruction) 方法进行界面跟踪, 用瞬态 PISO 方案求解控制方程, 对摇臂式喷头圆射流初级碎裂进行数值模拟, 获得了初级碎裂液滴直径和射流碎裂长度。采用高速摄影技术进行实验测量, 分析了初级碎裂液滴直径和射流碎裂长度模拟值和实测值的相对误差, 讨论了初级碎裂液滴直径和射流碎裂长度随喷嘴直径和工作压力的变化情况。结果表明, 摇臂式喷头圆射流初级碎裂包括连续段、过渡段和碎裂段 3 个典型形态, 喷嘴直径和入口压力是影响射流碎裂长度和射流初级碎裂液滴直径的主要因素, 射流初级碎裂液滴直径 D 与喷嘴直径 d ($d > 5\text{ mm}$) 有较好的相关性 ($D = 1.634d, R^2 = 0.912$), 初级碎裂液滴直径的模拟值与实测值相对误差为 23.92%, 拟合精度良好。给出了射流碎裂长度 L 与韦伯数 We 的拟合模型, 该模型能较好预测摇臂式喷头在低压条件下射流碎裂长度。

关键词: 摇臂式喷头 圆射流 碎裂长度 VOF 高速摄影

中图分类号: S22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0067-07

Experiment and Simulation of Primary Breakup Process of Impact Sprinkler Round Jet

Han Wenting^{1,2} Suo Wenhao¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to investigate the round jet fragmentation mechanism of impact sprinkler, the primary breakup process of impact sprinkler round jet was simulated by using geometry reconstruction interface tracking method based on VOF multiphase flow model provided by Fluent, and the primary breakup length and crusher droplet diameter were obtained under different low pressure conditions from 200 ~ 600 kPa. The results were compared with the high speed camera technology, and relative error between numerical simulation and experiment results of the breakup length and primary crushing droplet diameter was analyzed. The results showed that the primary breakup shapes included continuous, transitional and fragmental sections. Nozzle diameter and the inlet pressure were the main factors affecting droplet diameter and breakup length. Primary crushing droplet diameter and the nozzle diameter d ($d > 5\text{ mm}$) had a good correlation ($D = 1.634d, R^2 = 0.912$), the relative error of droplet diameter between simulation and experiment was 23.92%. The fitted relationship between Weber number (We) and breakup length L could predict the sprinkler breakup length under low pressure conditions. As the increase of Weber number, the breakup length increased. The results had a good significance on the theory of water round jet spray dispersion and irrigation uniformity improvement.

Key words: Impact sprinkler Round jet Breakup length VOF High speed camera

收稿日期: 2015-01-17 修回日期: 2015-02-17
^{*} 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-12-0473) 和科技部国际合作资助项目 (2014DFG72150)
作者简介: 韩文霆, 研究员, 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

引言

喷灌作为一种先进的节水灌溉技术推动了世界农业灌溉的发展,摇臂式喷头作为喷灌系统中的关键设备,由于其结构简单、工作可靠在国内外得到广泛应用。目前对其研究主要在基础理论、设计方法和喷洒性能等方面^[1-3]。对摇臂式喷头射流碎裂规律和影响因素的研究还较少,因此探明射流碎裂规律和影响因素,对优化喷嘴结构,改善喷灌系统具有指导意义。

对液体射流碎裂的探讨一直是流体力学界的主要研究问题,研究多采用理论分析、数值模拟和实验研究相结合的方法。理论研究方面,国内外学者多应用线性稳定性理论研究射流碎裂形态和特征,探寻影响射流碎裂的因素^[4-7]。数值模拟方面,采用 CFD 仿真软件 Fluent,许多学者对射流碎裂过程进行数值模拟,获得射流形态、速度与气液两相分布等信息,分析高压喷嘴碎裂长度和韦伯数的相互关系^[8-13]。Shinjo 等^[14]采用 DNS 模型模拟了高压水射流喷射的初级破碎过程。韩迎龙等^[15]基于 Fluent 对高压水射流撞击推进剂壁面的稳态流场进行了数值模拟研究,分析了喷嘴出口直径和射流攻角对流场的影响。Lebas 等^[16]在高韦伯数 We 和雷诺数 Re 下对射流数值模拟,对比分析了不同模型下射流的状态。实验研究方面,很多学者采用高速摄像机研究圆射流的表面剥离现象,实现射流在不同工况下破碎速度场、粒度场分布规律的测量,建立液柱在碎裂点之前抛物线的轨迹曲线公式^[17-19]。曹建明等^[20]对空气助力平面狭缝喷嘴在不同气流流速环境下水膜碎裂过程进行了实验研究,分析了水膜长度与雷诺数、空气助力流速的关系。李生勇等^[21]实验研究了冲击射流碎裂长度与射流直径、射流速度和射流流量的关系,并给出了冲击射流碎裂长度与出口韦伯数的拟合关系式。

上述研究多集中于高压力工况小直径喷嘴喷雾的雾化过程,对中低压下喷灌用大直径喷头的射流碎裂的研究还很少。在农业喷灌领域,喷头不仅要保证良好的雾化指标,还要求达到规定射程,因此,本文采用 Fluent 软件对中低压条件下摇臂式喷头圆射流初级碎裂进行数值模拟,并通过实验对比分析,探寻射流碎裂过程,分析喷嘴进口压力、喷嘴直径对射流碎裂的影响规律。

1 材料与方法

1.1 流场物理模型

在 Fluent 前处理软件 Gambit 中,建立射流流场

如图 1 所示,流场长度为 2 m,流场宽度为 0.5 m,流场左侧进口长度依次为 5.16、5.56、5.95、6.35 mm 的喷嘴直径。在二维自由射流问题中,考虑到该射流流场区域为规则形状,且射流碎裂过程受表面张力影响,所以采用结构化四边形网格进行区域划分,4 种直径的喷嘴射流流场网格数目分别为 27 500、33 000、37 050、39 900 个。最小网格尺寸分别为 1.03×4.00 、 1.11×3.33 、 0.85×3.08 、 0.91×2.86 (单位: mm × mm)。为确保射流模拟的精确性,喷嘴轴线上射流主要区域的网格密度较大,其他区域网格较为稀疏,由此提高软件的计算速度。

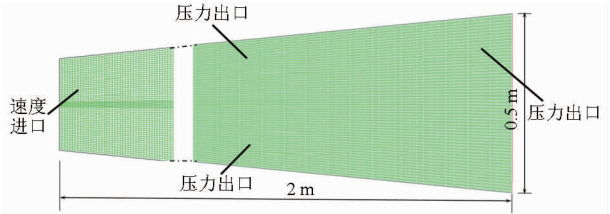


图 1 射流流场模型及网格

Fig. 1 Model and meshes of flow field

1.2 数值方法和边界条件

数值模拟流体的介质为水,该工况下喷头射流速度大,因而雷诺数较大,会产生湍流。假设水射流在常温下为不可压缩,故计算采用不可压缩流体的 N-S 时均方程作为控制方程。控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程、 k 方程和 ε 方程。流体流动控制方程的通用形式为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \mu \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S \tag{1}$$

式中 ϕ ——通用变量 S ——广义源项
 Γ ——广义扩散系数

考虑数值模拟过程中要捕捉射流界面发展、变形和碎裂过程,因此适合选择追踪自由表面的 VOF 模型。采用显示方案将离散的非线性控制方程线性化,使用分离式求解器求解方程组;由于对界面的追踪精度要求较高,因而选择对大多数瞬态 VOF 计算所使用的几何重建方法进行界面跟踪;瞬变流计算采用 PISO 方案求解控制方程,为了提高稳定性,设定欠松弛因子均为 0.5;设置连续性方程残差为 0.1, X 方向速度残差为 0.000 1, Y 方向速度残差为 0.000 1, 湍动能 k 方程残差为 0.000 1, 湍动能耗散率 ε 方程残差为 0.000 1;迭代计算的时间步长采用最小网格长度与射流速度比值的二分之一的原则确定为 0.000 1 s。在 VOF 提供的两方程湍流模型中,采用适用性广泛的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟计算,射流达到规定残差标准后,获得初级破碎液滴直径和射流碎裂长度的模拟值。

射流采用速度入口边界条件,为与实际工况下

喷嘴射流的出口速度相对应,入口速度采用如表 1 所示的数值作为参考。表 1 为 Nguyen Van Lanh^[22]对 200 ~ 600 kPa 压力入口的 Rainbird 30PSH 型摇臂式喷头的数值模拟结果,采用 200 ~ 600 kPa 压力入口条件,建立的数值模拟模型如图 2 所示,主喷嘴的出口速度模拟值为 250 次模拟的平均值,具有一定的准确性和参考性,因此将主喷嘴出口速度模拟值作为本次数值模拟的速度进口参数是可行的,从而确保了喷嘴射流速度与实际出口速度的相互对应。射流喷射进入到空气中,因而采用压力出口边界条件,考虑重力加速度的影响。

表 1 Rainbird 30PSH 型主喷嘴出口速度模拟值
Tab.1 Simulation values of velocity magnitude

工作压力/ kPa	主喷嘴直径/mm			
	5. 16	5. 56	5. 95	6. 35
200	7. 03	7. 22	7. 35	7. 52
300	10. 03	10. 39	10. 51	10. 77
400	12. 29	12. 81	12. 90	13. 16
500	14. 21	14. 78	14. 93	15. 31
600	16. 02	16. 47	16. 68	17. 22

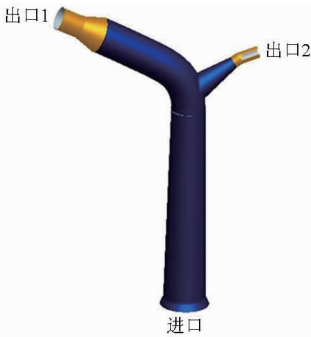


图 2 Rainbird 30PSH 型喷头数值模型
Fig.2 CFD model of Rainbird 30PSH sprinkler

1.3 实验系统和测量方法

测量射流碎裂的实验系统设计如图 3 所示,系统由稳压变频柜提供稳定工作压力,实验系统由管路供水系统、压力表、喷头、软尺、强光源、高速摄影仪和计算机采集系统构成。实验采用日本 NAC 高速摄影仪,120 W 自充电式白炽灯,使用高速摄影系统自带软件 HotShot SC 获取图像。压力表型号为 CWY100,量程为 0.1 ~ 1 MPa,精度为 ±0.1%。皮尺量程为 10 m,精度为 1 mm,均可满足实验要求。实验用 Rainbird 30PSH 型喷头的主喷嘴结构如图 4 所示,喷嘴直径 d 分别为 5.16、5.56、5.95、6.35 mm,喷嘴长度 l 为 21.8 mm。射流碎裂实验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院水力学大厅进行,室内实验布置如图 5 所示。

实验时喷头安装高度距离地面 110 cm,高速摄

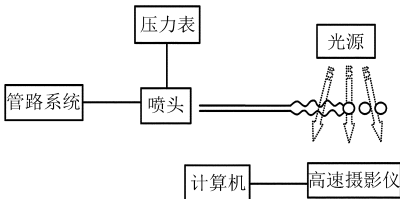


图 3 实验系统设计图
Fig.3 Design of experimental system

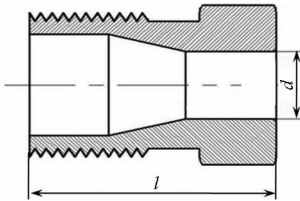


图 4 主喷嘴结构示意图
Fig.4 Structure of range nozzle

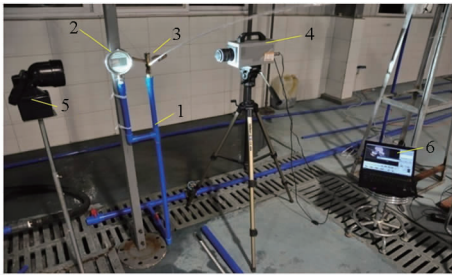


图 5 实验布置图
Fig.5 Experimental layout

1. 管路系统 2. 压力表 3. Rainbird 30PSH 型喷头 4. NAC 高速摄影仪 5. 120 W 强光源 6. 计算机

影仪和白炽灯分别布置在射流两侧 50 cm 处,使强光源通过射流,调节镜头焦距,高速摄影仪可清晰捕捉到射流动态,精确反映到计算机采集软件上。射流稳定后,通过移动光源和高速摄影仪寻找射流断裂点位置,找到射流碎裂点,采用皮尺测量射流碎裂长度,采用 HotShot SC 软件中的尺寸测量模块对高速摄影仪监测到的初级碎裂液滴的直径进行测量,定义射流稳定后从喷嘴出口到液柱出现断裂的长度为射流碎裂长度。射流实验参数见表 2。

表 2 射流实验参数
Tab.2 Parameters in experiment

参数	数值
水密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	998
水粘度/($\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$)	1.01×10^{-3}
空气流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.1 ~ 0.5
空气密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.293
空气粘度/($\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$)	1.79×10^{-5}
水表面张力/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	0.072

实验中,每间隔 100 kPa,分别在 5 组压力下,依次测量 4 种不同直径喷嘴的喷头射流碎裂长度和初级碎裂液滴直径。考虑到提供动力的水泵为离心

泵,喷嘴出口产生的脉动压力对于射流碎裂会有影响,所以对每个喷头达到稳定射流后的射流碎裂长度测量 3 次,取 3 次平均值为此压力下的射流碎裂长度 L 。测量高速摄像仪所监测的初级碎裂液滴 25 个,取 25 次测量的液滴最大直径平均值作为初级碎裂液滴直径 D 。

2 结果与讨论

2.1 射流实验和数值模拟对比

在 200 kPa 压力条件下,5.16 mm 喷嘴的喷头初级射流碎裂实验结果如图 6 所示。图 6a 为射流在

喷嘴出口处的形态,圆射流呈现连续状形态;图 6b 为射流离开喷嘴后,受周围空气扰动和液柱表面张力作用,开始出现液柱的扭曲变形,并形成断裂边界,呈现断裂与非断裂的过渡段;图 6c 为射流从断裂边界处开始断裂,并依次形成直径大小近似的液滴,整体呈现碎裂段;图 6d 为上述 3 个射流典型阶段的拼接示意图,圈中是高速摄影仪所捕捉到的圆射流初级碎裂形成的近似等直径液滴,测量 25 个液滴直径平均后得到 5.16 mm 喷嘴在 200 kPa 压力条件下,射流初级碎裂液滴直径 D 为 6.347 mm,射流碎裂长度 L 为 61.5 cm。

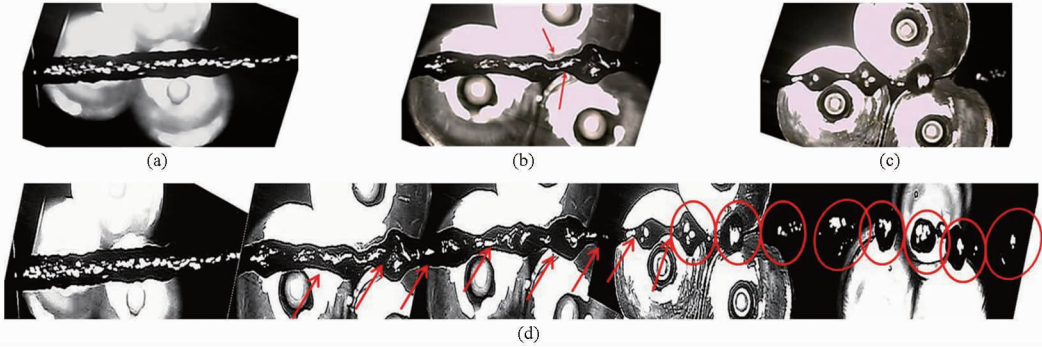


图 6 200 kPa 压力下 5.16 mm 喷嘴初级射流碎裂实验
Fig. 6 Primary breakup experiment of 5.16 mm nozzle under 200 kPa
(a) 连续段 (b) 过渡段 (c) 碎裂段 (d) 射流典型阶段拼接图

图 7 为在 200 kPa 工作压力下,5.16 mm 直径的喷嘴射流初级碎裂水相体积分数云图。从图 7 可知,射流从喷嘴射出,逐步衍生并且穿越流场,断裂形成多个初级碎裂液滴,液滴直径近似相等,液滴的间隔也大致相等,连续射流出现断裂现象。模拟计算达到所设定的残差指标后,测量射流碎裂长度 L 和初级碎裂液滴直径 D 。对于射流碎裂长度 L 和初

级碎裂液滴直径 D 的计算采用的方法是:已知流域的大小尺寸,按喷嘴直径显示大小尺寸和实际尺寸的比例关系求解计算得到初级碎裂液滴直径 D ,对于窄长形液滴,计算最大直径作为液滴直径,多次平均以减小误差。通过计算可得,初级碎裂液滴直径 D 的模拟值约为 8.411 mm,射流碎裂长度 L 的模拟值约为 68.5 cm。

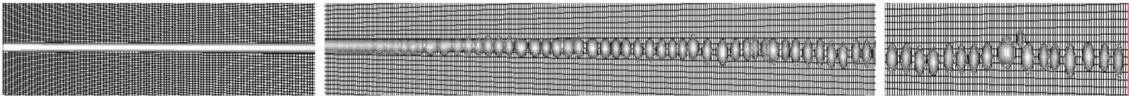


图 7 200 kPa 压力下 5.16 mm 喷嘴初级射流碎裂模拟体积分数(水)云图
Fig. 7 Contours of volume fraction (water) primary breakup simulation of 5.16 mm nozzle under 200 kPa

2.2 射流碎裂长度随入口压力和喷嘴直径的变化

200 ~ 600 kPa 压力下,射流碎裂长度的模拟值和实测值随工作压力和喷嘴直径的变化趋势如图 8 所示。由图 8 可知,特定直径喷嘴的射流碎裂长度随工作压力是递增的变化趋势,相同压力下随着喷嘴直径增大,射流碎裂长度模拟值和实测值是增大的,说明喷嘴直径和喷嘴进口压力是影响射流碎裂的主要因素。相同工况下射流碎裂长度的模拟值大于实测值,碎裂长度模拟值与实测值的相对误差分析见表 3,射流碎裂长度的模拟值与实测值相对误差最大为 16.24%,最小为 3.50%,模拟值与实测值之间的平均相对误差为 10.78%,可认为采用的数

值模拟方法是成功的。

2.3 初级碎裂液滴直径随入口压力、喷嘴直径的变化

200 ~ 600 kPa 压力下,射流初级碎裂形成的液滴直径模拟值和实测值随工作压力和喷嘴直径的变化趋势如图 9 所示。由图 9 可知,随工作压力的递增,特定直径喷嘴的射流初级碎裂液滴直径模拟值和实测值呈减小趋势;特定压力下,随喷嘴直径的增加,射流初级碎裂液滴直径是增大的,说明喷嘴直径和喷嘴进口压力是影响射流初级碎裂液滴直径的主要因素。同等工况下,射流初级碎裂液滴直径的模拟值大于实测值,模拟值与实测值的相对误差分析

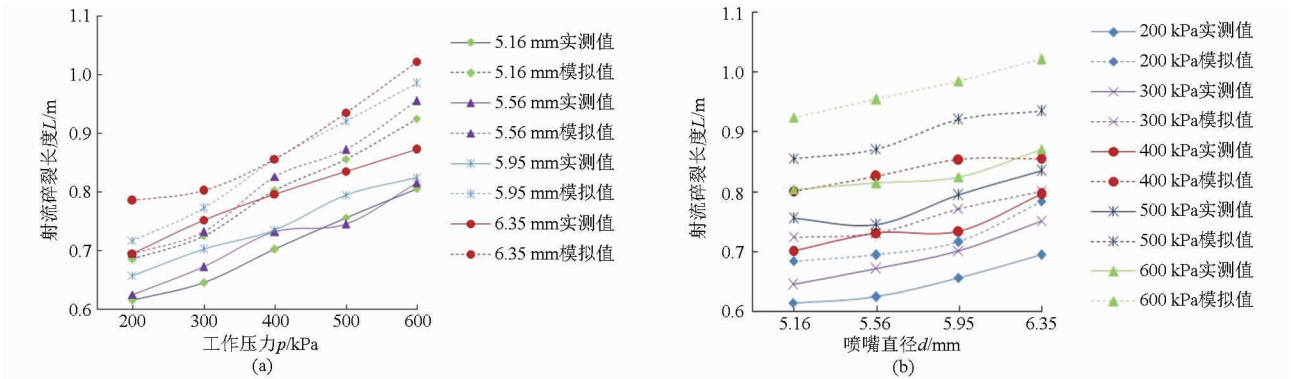


图 8 射流碎裂长度随工作压力和喷嘴直径的变化趋势
Fig. 8 Breakup length with inlet pressure under different diameters

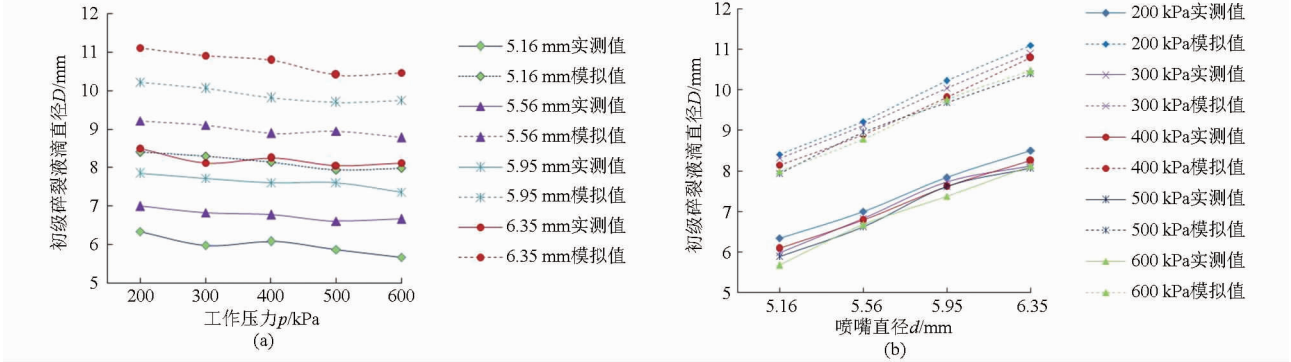


图 9 初级碎裂液滴直径 D 随工作压力和喷嘴直径的变化趋势
Fig. 9 Primary droplet diameter with inlet pressure under different diameters

见表 3,模拟值与实测值相对误差最大为 29.03%,最小为 21.48%,模拟值与实测值之间的平均误差为 24.39%。

表 3 射流碎裂长度 L 和初级碎裂液滴直径 D 实测值与模拟值的相对误差分析

Tab.3 Relative error analysis between simulation and experiment results %

工作 压力/ kPa	喷嘴直径/mm							
	5.16		5.56		5.95		6.35	
	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2
200	24.54	10.22	24.10	10.07	23.26	8.37	23.43	11.47
300	27.95	11.03	25.00	8.20	23.08	9.07	25.58	8.73
400	25.32	12.47	23.75	11.38	22.43	14.04	23.52	3.50
500	25.97	11.68	26.09	14.56	21.48	13.68	22.56	6.74
600	29.03	12.97	24.05	14.66	24.39	16.24	22.43	6.56

注: δ_1 为初级碎裂液滴直径相对误差, δ_2 为碎裂长度相对误差。

2.4 模拟数据拟合曲线

Rayleigh 在低速圆射流研究中,得到低速圆射流碎裂的大颗粒液滴直径 D 与喷嘴直径 d 的关系为

$$D = 1.89d \tag{2}$$

其主要适用于低速射流。而且大颗粒液滴的尺寸均匀一致,间隔大致相等,这一结果在数值模拟中也进一步得到了验证。但对于大直径的喷头 ($d >$

5 mm),射流速度一般在 7 ~ 20 m/s 的范围中,所以对其进行数值关系的正比例拟合。图 10 为射流初级破碎液滴直径 D 与喷嘴直径 d 的拟合关系式,由图可知,数值模拟的初级破碎液滴直径 D 与喷嘴直径 d 拟合的正比例关系式为

$$D = 1.634d \quad (R^2 = 0.912) \tag{3}$$

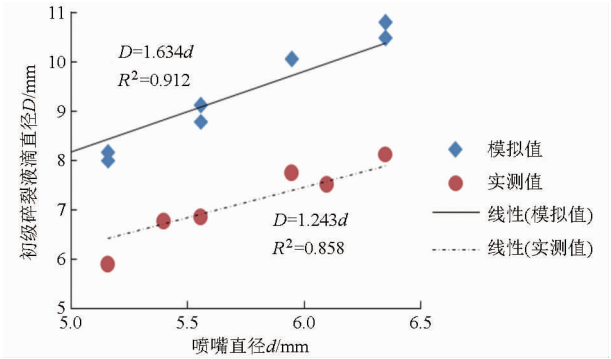


图 10 射流初级碎裂液滴直径 D 与喷嘴直径 d 的拟合关系

Fig. 10 Fitted relationship between droplet size and nozzle diameter

实验测量射流初级破碎液滴直径 D 与喷嘴直径 d 的拟合关系式为

$$D = 1.243d \quad (R^2 = 0.858) \tag{4}$$

式中喷嘴直径 d 主要针对大直径喷嘴 ($d > 5$ mm)。

分析可知,采用模拟数据所拟合的关系式与实验数据相比较,误差为 23.92%,模拟值与实测值拟合精度良好,因此,可采用数值模拟的拟合关系式(3)来预测 200 ~ 600 kPa 低压条件下的 Rainbird 30PSH 型摇臂式喷头射流初级破碎液滴直径。

研究表明,若忽略温度影响,影响射流破碎的因素主要有表面张力、粘性、气液作用力、重力等,其相对大小可采用无量纲数韦伯数 We ($We = \rho v^2 l' / \sigma$) 来表征,韦伯数代表惯性力和表面张力效应之比,韦伯数愈小代表表面张力愈重要。 ρ 为流体密度, v 为射流速度, σ 为流体表面张力系数, l' 为特征长度,由于侧重考察不同喷嘴直径对射流碎裂的影响,所以特征长度 l' 取值为喷嘴直径。考虑到气液密度和重力等参数相同,采用射流碎裂长度的模拟值分析其受韦伯数 We 的影响。图 11 为随韦伯数 We 变化,射流碎裂长度 L 与喷嘴直径 d 组成的无量纲数 L/d 的变化情况,通过对模拟数据分析,可得到拟合曲线

$$L/d = 15.62 \ln We - 11.12 \quad (R^2 = 0.917) \quad (5)$$

经过与实验测量数据对比,误差为 8.23%,说明拟合精度较好。因此,可采用式(5)来表征 200 ~ 600 kPa 低压条件下射流碎裂长度受韦伯数 We 影响的规律。

3 结论

(1) 摇臂式喷头圆射流初级碎裂形态主要有连

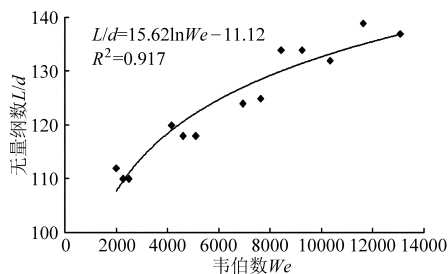


图 11 射流出口 We 与 L/d 拟合关系

Fig. 11 Fitted relationship between We and L/d

续段、过渡段和碎裂段 3 个典型形态。

(2) 低压条件下 (200 ~ 600 kPa), 喷嘴直径一定, 射流碎裂长度随喷嘴入口压力增大而增大, 压力一定, 射流碎裂长度随喷嘴直径增大而增大。喷嘴直径一定, 射流初级破碎液滴平均直径随入口压力增大而减小; 压力一定, 射流初级破碎液滴平均直径随喷嘴直径增大而增大。

(3) 得到射流初级破碎液滴平均直径 D 与喷嘴直径 d ($d > 5$ mm) 的关系式 ($D = 1.634d$, $R^2 = 0.912$), 与实验测量结果对比相对误差为 23.92%, 拟合精度良好。可用此模型来预测低压条件下摇臂式喷头初级破碎液滴的直径。

(4) 低压条件下 (200 ~ 600 kPa), 韦伯数 We 增大, 射流碎裂长度 L 增大, 增大趋势逐渐变缓。建立了 L/d 与韦伯数 We 的拟合模型, 该模型能较好预测摇臂式喷头在低压条件下的射流碎裂长度。

参 考 文 献

- 1 严海军, 刘竹青, 王福星, 等. 我国摇臂式喷头的发展[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(1): 77-80.
Yan Haijun, Liu Zhuqing, Wang Fuxing, et al. Research and development of impact sprinklers in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(1): 77-80. (in Chinese)
- 2 韩文霆, Nguyen Van Lan, 徐琳. 摇臂式喷头内流道流场数值模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 58-64.
Han Wenting, Nguyen Van Lan, Xu Lin. Investigations on internal flow characteristics of impact sprinkler based on numerical simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 58-64. (in Chinese)
- 3 韩文霆, 崔利华, 吴普特, 等. 正三角形组合喷灌均匀度计算方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 99-106.
Han Wenting, Cui Lihua, Wu Pute, et al. Calculation methods for irrigation uniformity with sprinklers spaced in regular triangle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 99-106. (in Chinese)
- 4 Mitra S K, Li X, Renksizbulut M. On the breakup of viscous liquid sheets by dual-mode linear analysis[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(3): 728-735.
- 5 Mehring C, Sirignano W A. Disintegration of planar liquid film impacted by two-dimensional gas jet[J]. Physics of Fluids, 2003, 15(5): 1158-1177.
- 6 Samas G, Jiang X. Direct numerical simulation of a liquid sheet in a compressible gas stream in axisymmetric and planar configurations[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2007, 21(6): 447-471.
- 7 Tharakan T J, Ramamurthi K. Growth of longitudinal waves in plane liquid sheets having lateral wave modes when exposed to two gas streams of unequal velocities[J]. Atomization and Sprays, 2005, 15(2): 181-200.
- 8 陆金刚, 龚晨, 闫龙, 等. 高速水射流束集束性的数值模拟及试验研究[J]. 工程热物学报, 2014, 34(8): 1526-1529.
Lu Jin'gang, Gong Chen, Yan Longlong, et al. Numerical simulation and experimental study of the coherence of high-speed water jet [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 34(8): 1526-1529. (in Chinese)
- 9 刘力红, 曹寒冰. 基于 Fluent 的前混合磨料水射流高压管道流场的数值模拟[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2014, 37(5): 77-80.
Liu Lihong, Cao Hanbing. Numerical simulation of high pressure pipeline flow field in pre-mixed abrasive water jet with fluent[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 37(5): 77-80. (in Chinese)
- 10 Arnaud E, Stéphane V, Pascale S P. Numerical investigations of liquid jet breakup in pressurized carbon dioxide: conditions of

- two-phase flow in supercritical antisolvent process[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2012,63:16–24.
- 11 Julien D, Stéphane V, Arnaud E, et al. Numerical investigations in Rayleigh breakup of round liquid jets with VOF methods[J]. Computers & Fluids, 2011,50:10–23.
- 12 余留芳,张金阳,刘志农. 旋转喷头喷射外流场计算流体力学仿真分析[J]. 清洗世界, 2011,27(5):15–18,28.
Yu Liufang, Zhang Jinyang, Liu Zhinong. Rotating nozzle outflow field computational fluid dynamics simulation analysis[J]. Cleaning World, 2011, 27(5):15–18,28. (in Chinese)
- 13 王启武. 高压喷嘴的流场仿真分析[J]. 钢铁研究, 2009,37(4):8–10.
Wang Qiwu. Simulation and analysis for flow field of high-pressure nozzle[J]. Research on Iron & Steel, 2009,37(4):8–10. (in Chinese)
- 14 Shinjo J, Umemura A. Simulation of liquid jet primary breakup: dynamics of ligament and droplet formation[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010,36(7):513–532.
- 15 韩迎龙,李进贤,曹琪,等. 高压水射流撞击推进剂壁面稳态流场的数值模拟[J]. 火炸药学报,2010,33(5):55–59.
Han Yinglong, Li Jinxian, Cao Qi, et al. Numerical simulation on steady flow field of high pressure water-jet impacting propellant wall [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(5):55–59. (in Chinese)
- 16 Lebas R, Menard T, Beau P A, et al. Numerical simulation of primary break-up and atomization: DNS and modelling study[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009,35(3):247–260.
- 17 伊吉明,白富强,常青,等. 撞击式射流速度特性及液滴粒度特性试验[J]. 内燃机学报,2013,31(6):519–524.
Yi Jiming, Bai Fuqiang, Chang Qing, et al. Experiment on velocity and size distribution of droplets produced by an impinging liquid jet[J]. Transactions of CSICE, 2013,31(6):519–524. (in Chinese)
- 18 朱英,黄勇,王方,等. 横向气流中的液体圆形射流破碎实验[J]. 航空动力学报, 2010,25(10):2261–2265.
Zhu Ying, Huang Yong, Wang Fang, et al. Experiment on the breakup of round liquid jets in cross airflows[J]. Journal of Aerospace Power, 2010,25(10):2261–2265. (in Chinese)
- 19 万云霞,黄勇,朱英. 液体圆柱射流破碎过程的实验[J]. 航空动力学报,2008,23(2):208–214.
Wan Yunxia, Huang Yong, Zhu Ying. Experiment on the breakup process of free round liquid jet[J]. Journal of Aerospace Power, 2008,23(2):208–214. (in Chinese)
- 20 曹建明,蹇小平,李跟宝,等. 平面液体层碎裂过程实验研究[J]. 实验力学, 2010,25(3):2261–2265.
Cao Jianming, Jian Xiaoping, Li Genbao, et al. Experimental investigation on break up process of planar liquid jet film[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010,25(3):2261–2265. (in Chinese)
- 21 李生勇,李谋渭,王邦文,等. 圆形冲击射流破碎现象的实验和数值模拟研究[J]. 冶金设备,2006(4):22–24,44.
Li Shengyong, Li Mouwei, Wang Bangwen, et al. Numerical simulation on the breakup of round impinging jet[J]. Metallurgical Equipment, 2006(4):22–24,44. (in Chinese)
- 22 Nguyen Van Lanh. Based on Pro/E reconstruct sprinkler structure and investigations on internal flow characteristic of the sprinkler by numerical simulation and experiment methods [D]. Yangling:Northwest A&F University, 2011.

(上接第 38 页)

- 13 代丽,孙良,赵雄,等. 基于运动学目标函数的插秧机分插机构参数优化[J]. 农业工程学报, 2014,30(3):35–42.
Dai Li, Sun Liang, Zhao Xiong, et al. Parameters optimization of separating-planting mechanism in transplanter based on kinematics objective function[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(3):35–42. (in Chinese)
- 14 李革,李辉,杨爱茜,等. 傅立叶曲线非圆齿轮系分插机构运动学分析[J]. 农业工程学报, 2011,27(8):126–131.
Li Ge, Li Hui, Yang Aiqian, et al. Kinematic analysis on Fourier curve non-circular gears transplanting mechanism [J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(8):126–131. (in Chinese)
- 15 赵伟康,高阳,薛永风,等. 前插式直齿双控制分插机构设计与运动分析[J]. 农业机械学报, 2010,41(8):48–50.
Zhao Weikang, Gao Yang, Xue Yongfeng, et al. Design and kinematic analysis of double controlled forward transplanting mechanism with spur gears [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):48–50. (in Chinese)
- 16 张敏,周长省,张文毅. 相位不同椭圆齿轮行星系分插机构运动分析[J]. 中国农机化学报, 2014,35(1):141–144,120.
Zhang Min, Zhou Changsheng, Zhang Wenyi. Kinematic analysis of transplanting mechanism with differ phase elliptic gears transmission[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014,35(1):141–144,120. (in Chinese)
- 17 季顺中,李双,陈树人,等. 基于 ADAMS 的高速插秧机三插臂分插机构运动仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊):82–85.
Ji Shunzhong, Li Shuang, Chen Shuren, et al. Research in kinematical simulation of three separating-planting bar of high-performance rice transplanter based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.):82–85. (in Chinese)
- 18 吴序堂,王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- 19 姚文席. 非圆齿轮设计[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- 20 GB/T 6243—2003 水稻插秧机 试验方法[S]. 2003.
- 21 GB/T 20864—2007 水稻插秧机 技术条件[S]. 2007.
- 22 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert, SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- 23 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2004.