

低压射流不同喷嘴参数及压力下破碎过程实验*

蒋跃 李红 向清江 陈超

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 研究了不同低压下喷头喷嘴直径和喷嘴锥角对射流破碎的影响。采用高速摄像仪对低压圆柱射流的射流核心长度和射流破碎长度进行实验,测量了不同喷嘴结构的流量、射程和末端水滴直径。结果表明:同一压力下,当喷嘴锥角不变时,随着喷嘴直径的增大,喷头流量、射程和喷头末端水滴直径都变大,射流核心长度和破碎长度均增大;当喷嘴直径不变时,随着喷嘴锥角的增大,喷头流量逐渐减小,而喷头射程呈先增大后减小趋势,喷头末端水滴直径也变大,射流核心长度逐渐减小,射流破碎长度先减小后增大。综合考虑射程和雾化效果,直径为 5 mm、锥角为 45°的喷嘴为最优选择。同时通过对不同 Re 数和 We 数的实验和分析,给出了适合低压喷嘴的两种射流特征长度的拟合关联式。

关键词: 喷嘴 圆柱射流 破碎过程 核心长度 破碎长度

中图分类号: S277.9⁺4; TP6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0078-05

Experiment on Breakup Process of Low-pressure Jets with Different Nozzle Parameters and Pressures

Jiang Yue Li Hong Xiang Qingjiang Chen Chao

(Research Center of Fluid Machinery and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to identify the two characteristic lengths of breakup process of low-pressure jets, the relationship between different diameters and angles of entrance of jet nozzle on the breakup of low-pressure jet under different pressures was studied. An experiment was conducted to investigate the core lengths and breakup lengths of a round water jet. The flow, ranges and ending raindrop diameters were measured under low jet velocity. The results showed that with the increase of nozzle diameter, the flow, ranges, ending raindrop diameters, core lengths and breakup lengths became larger. With the increase of nozzle cone angle, the flow became smaller, the ranges increased at first then decreased, the ending raindrop diameters increased and the core lengths decreased, but the breakup length decreased at first then increased. The ranges and the atomizing condition showed that the diameter of nozzle of 5 mm and cone angle of nozzle of 45° were the best. Correlation equation was proposed based on the analysis of effect of Re and We on the core length and breakup length.

Key words: Nozzle Round jet Breakup process Core length Breakup length

引言

液体雾化作为一项重要的实用技术,在许多工

业领域都得到了广泛的应用。圆柱射流破碎是射流雾化中最简单和最早提出的一种,国内外学者对圆柱射流的变形和破碎进行了大量深入的研究^[1-4]。

收稿日期: 2014-04-02 修回日期: 2014-06-05

* 国家自然科学基金资助项目(51379090)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100506)、江苏省 2014 年度普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX_1041)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 蒋跃,博士生,主要从事节水灌溉理论研究,E-mail: jy261715267@126.com

通讯作者: 李红,研究员,博士生导师,主要从事节水灌溉理论及技术研究,E-mail: hli@ujs.edu.cn

参数	数值
实验温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
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
空气流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.1~0.5

2 实验结果与分析

2.1 喷嘴水力性能

2.1.1 流量和射程

以 PY₂15 型喷头为样机,其离地安装高度为 0.85 m,喷射仰角为 23°,喷头工作压力设为 200、250、300、350、400 kPa,每个压力重复 3 次求平均值。对上述 5 种不同结构尺寸的喷嘴进行流量和射程的测量,结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出:在 200 ~ 400 kPa 压力下,随

着压力的增大,喷头流量和射程相应增大;同一压力下,当喷嘴锥角不变时,随着喷嘴直径的增大,喷头流量和射程都变大;在同一压力下,当喷嘴直径不变时,随着喷嘴锥角从 35°到 55°,喷头流量逐渐减小,而喷头射程呈先增大后减小趋势,这与文献[12]所提及的喷嘴锥角与射程关系相符。当喷嘴直径为 6 mm、锥角为 45°时,喷头的流量和射程均为最大,因此要保证喷头的射程较远,应尽量选取流量大的喷嘴。

表 2 PY₂15 型喷头不同压力下的流量及射程
Tab.2 Flow and ranges under different pressures of PY₂15 sprinkler

喷嘴 直径/ mm	喷嘴 锥角/ (°)	工作压力/kPa									
		200		250		300		350		400	
		流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	射程/m	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	射程/m	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	射程/m	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	射程/m	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	射程/m
4	45	0.804	14.9	0.898	16.1	0.984	16.9	1.068	17.5	1.148	17.6
5	45	1.192	16.1	1.350	17.2	1.507	18.0	1.618	18.5	1.732	19.7
6	45	1.792	16.8	1.971	18.3	2.201	19.9	2.383	20.8	2.554	21.5
5	35	1.290	15.9	1.430	17.0	1.572	17.9	1.724	18.5	1.847	19.0
5	55	1.140	14.1	1.301	16.8	1.415	17.6	1.529	18.2	1.635	18.8

2.1.2 末端水滴直径

雨滴直径是喷头水力性能的一个重要指标。喷头工作时,喷洒水滴直径沿射程径向呈递增趋势,在末端出现水滴直径最大值,故只测试其末端直径。

采用 LNM 激光雨滴谱仪进行末端水滴直径的测量,将测量数据以 Excel 表格形式输出,并通过水重加权平均法计算水滴的末端平均直径,结果如表 3 所示。

直径或减小喷嘴锥角时射程也相应降低。因此,要使喷头既有较远的射程又有较好的雾化效果,应选取合理参数配比的喷嘴。

2.2 射流特征长度

研究表明,在无温度影响条件下,影响射流破裂的因素主要有黏性力、表面张力、气液作用力、重力、惯性力等,其相对大小可分别用无量纲数(*Re*、*We*)来表征。由于气液密度比值和重力加速度基本保持不变,所以本实验仅考虑 *Re* 数、*We* 数对射流破裂的影响。

本文定义了两种射流特征长度:

(1)液体从喷嘴射出后并非瞬间破碎,而是在液柱内存在一个长度与喷嘴直径呈正比的连续液体核心,将第一时间出现断裂的长度称之为射流核心长度。

定义喷嘴出口到第一时间可见大量液滴的长度为圆柱射流破碎长度。

射流在高压条件下会直接产生雾化现象,流体在喷嘴出口附近直接破碎而不会形成本文所定义的核心长度。因此,本文实验工作水压力属于低压,范围在 200 ~ 400 kPa 内。

图 4 为喷嘴直径为 5 mm 的喷头在 5 种压力下得到的射流核心长度和破碎长度示意图,其图像摄像曝光时间是 30 μs,图片中射流方向均为从左到右。为确保测量参数的准确性,实验中所用的测量

表 3 PY₂15 型喷头不同压力下的末端水滴直径
Tab.3 Ending raindrop diameters under different pressures of PY₂15 sprinkler

喷嘴 直径/ mm	喷嘴 锥角/ (°)	工作压力/kPa					mm
		200	250	300	350	400	
4	45	4.18	4.11	4.05	3.99	3.84	
5	45	4.21	4.19	4.15	4.09	3.99	
6	45	4.25	4.19	4.13	4.09	4.01	
5	35	4.15	4.12	4.08	4.01	3.92	
5	55	4.20	4.16	4.11	4.07	3.97	

由表 3 数据得出,随着压力的增大,喷头的末端水滴直径逐渐减小,说明压力越大,射流的雾化效果越好;同一压力下,当喷嘴锥角不变时,随着喷嘴直径的增大,喷头末端水滴直径变大;在同一压力下,当喷嘴直径不变时,随着喷嘴锥角的增大,喷头末端水滴直径呈先增大后减小趋势,这与不同锥角喷嘴射程的变化规律相似。但由表 2 可知,当减小喷嘴

米尺从 30 cm 处开始测量,即实验时确保米尺 30 cm 处与喷嘴的出口平行。图中从左到右分别表示压力为 200、250、300、350、400 kPa,压力由低逐渐增大。

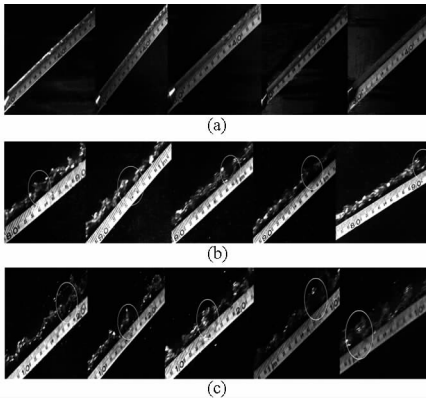


图 4 不同压力下射流破碎示意图

Fig. 4 Photographs of breakup process of jets under different pressures

(a) 射流起始段 (b) 射流核心段 (c) 射流破碎段

图 4 中,用白圈标识的地方即为射流核心断裂处和射流破碎处。可以发现,由于实验采用了低压大直径喷嘴,其射流核心长度和破碎长度相应增大。随着压力的不同,射流核心长度和破碎长度不尽相同。从受力方面分析,当射流达到核心长度时,射流表面逐渐变得不光滑,表面波频率变快,但此刻并没有出现剥离小液滴,此时主要是因为射流受到的空气动力的作用不足以克服液体表面张力的作用而产生液滴的飞溅。当射流达到破碎长度时,可以看到有大量的液滴飞溅,空气对射流的作用力大于表面张力使射流发生破碎。

2.2.1 Re 数和 We 数对射流核心长度的影响

图 5 为 Re 数与射流核心长度的关系图,其中 L_c 为射流核心长度。由图可以看出,随着 Re 数的增大,射流核心长度减小。但在 5 mm、45° 和 6 mm、45° 中观察到,随着 Re 数的增加,射流核心长度出现先增大后减小的情况,这也与表 2 分析的射程与喷嘴直径间的关系相符合。这说明随着射流流速的增大,流体在一段时间内处于紊流状态,但干扰波的传播速度受到抑制,使得核心长度也随着增大。但当 Re 数增大,使相对速度达到足够大时,干扰波的传播速度和程度得到加强进而使得射流出现断裂,射流核心长度开始减小。

图 6 为 We 数与射流核心长度的关系图。由图可以看出,随着 We 数的增大,射流核心长度减小。 We 数表征的是惯性力与射流表面张力之间的关系, We 数的增大反映了惯性力对射流表面张力的克服作用,使得射流容易达到破碎程度。同样在 5 mm、45° 和 6 mm、45° 中也观察到,随着 We 数的增加,射

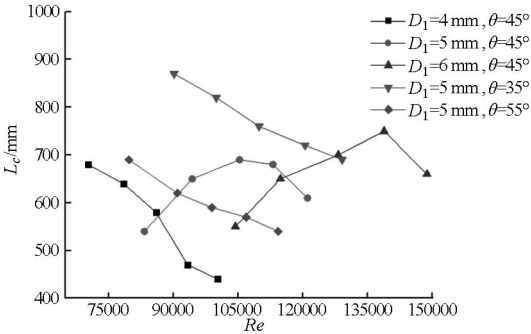


图 5 Re 数与射流核心长度的关系

Fig. 5 Variation of jet core length with Re

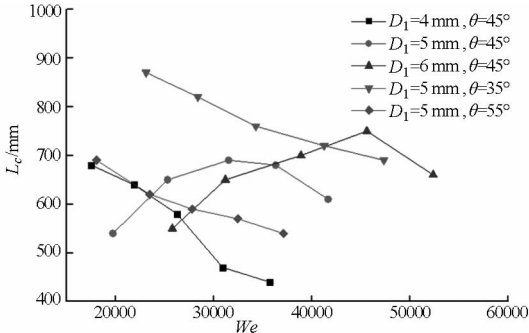


图 6 We 数与射流核心长度的关系

Fig. 6 Variation of jet core length with We

流核心长度也出现先增大后减小的情况。这说明在射流表面张力保持不变的情况下,大直径喷嘴随着射流流速的增大,核心长度也随着增大。但当相对速度达到足够大时,气动力的作用足以克服表面张力作用进而使得射流出现断裂,射流核心长度开始减小。

2.2.2 Re 数和 We 数对射流破碎长度的影响

图 7、8 分别为 Re 数和 We 数与射流破碎长度的关系图,其中 L_b 为射流破碎长度。由图可以看出,随着 Re 数和 We 数的增大,射流破碎长度均逐渐减小。可以看出,4 mm、45° 喷嘴在 250 ~ 400 kPa 压力下射流破碎长度均为最短;同一锥角下,随着喷嘴直径的增大,在各个压力下射流破碎长度均增大;在同一直径下,5 mm、35° 喷嘴在各个压力下射流破碎长度最长,5 mm、45° 喷嘴在各个压力下射流破碎长度

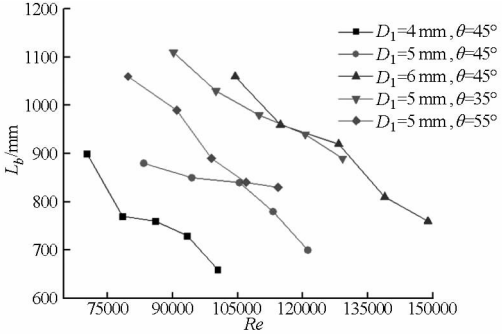


图 7 Re 数与射流破碎长度的关系

Fig. 7 Variation of jet breakup length with Re

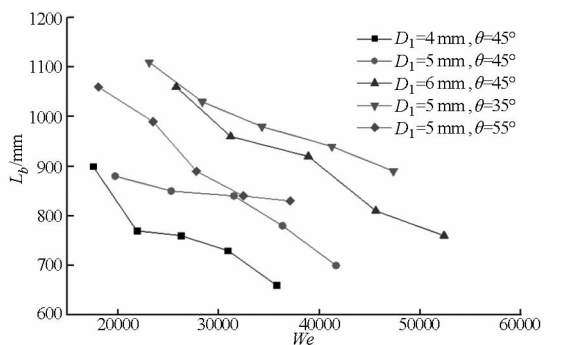


图8 We数与射流破碎长度的关系

Fig. 8 Variation of jet breakup length with We

最短。结合表2中各个喷嘴射程长度可知,尽管5 mm、45°喷嘴射程较6 mm、45°喷嘴射程短一些,但其射流破碎长度最短,雾化效果更好。另一方面,5 mm、45°喷嘴射流破碎长度较4 mm、45°的喷嘴长,雾化效果差些,但其射程较4 mm、45°的喷嘴高。因此,综合考虑射程和雾化效果,5 mm、45°喷嘴为最优选择。

2.2.3 破碎长度经验关系式

对于射流核心长度及射流破碎长度经验关系,前人已给出了一些相关的经验关系式。然而,这些关系式所涉及到的射流破碎均为高压微喷嘴射流。如Yeh和Rochelle通过研究4种商业小型喷嘴($d < 2$ mm),归纳出一个关联式为

$$\frac{L}{d} = 4\,740 Re^{-0.8} We^{0.07} \quad (1)$$

而本文所研究的为低压大喷嘴射流破碎,其破碎长度变化规律与高压射流破碎不尽相同,故本文给出低压下两种射流特征长度的拟合关系式为:射流核心长度 L_c

$$\frac{L_c}{d} = 29.01 Re^{-0.2011} We^{0.3502} \quad (d \geq 5 \text{ mm}) \quad (2)$$

射流破碎长度 L_b

$$\frac{L_b}{d} = 5.7495 e^{-3} Re^{2.1658} We^{-1.4497} \quad (d \geq 5 \text{ mm}) \quad (3)$$

经过对比发现,实验数据与拟合公式计算结果误差小于6%,说明拟合精度较好。而式中的常数出现的 10^{-3} 量级,说明影响射流破碎的还有其它相关参数,只是在本实验中未考虑相关参数的变化,因此对于低压射流破碎的研究有待进一步深入。

3 结论

(1)通过实验对比5种不同结构参数的喷嘴,发现工作压力相同时,当喷嘴锥角不变,随着喷嘴直径的增大,喷头流量系数、射程和喷头末端水滴直径都变大;当喷嘴直径不变,随着喷嘴锥角的增大,喷头流量系数逐渐减小,而喷头射程呈先增大后减小趋势,喷头末端水滴直径也变大。

(2)随着 Re 数和 We 数的增大,各种尺寸的喷嘴射流核心长度和破碎长度均逐渐减小,其中5 mm、45°和6 mm、45°喷嘴射流核心长度呈先增大后减小趋势。同一锥角45°下,随着喷嘴直径从4 mm增大到6 mm,各个压力下射流核心长度和破碎长度均增大;同一直径5 mm下,随着喷嘴锥角从35°增大到55°,射流核心长度逐渐减小,射流破碎长度先减小后增大。考虑射程和雾化效果,比较发现5 mm、45°喷嘴是最优的。

(3)给出了不同 Re 数和 We 数下射流核心长度 L_c 和射流破碎长度 L_b 的拟合关系式。并与实验数据进行了对比,发现误差在6%以内,说明拟合关系曲线精度较高。

参考文献

- 1 Arai M, Amagai K. Surface wave transition before break-up on a laminar liquid jet[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20(5): 507-512.
- 2 Reitz R D, Bracco F V. Mechanism of atomization of a liquid jet[J]. Physics of Fluids, 1982, 25(10): 1730-1742.
- 3 Varga C M. Atomization of a small diameter liquid jet by a high speed gas stream[D]. San Diego: University of California, 2002.
- 4 康灿,杨敏官,张峰,等. 圆柱水射流中的能量分布与统计特征[J]. 排灌机械工程学, 2011, 29(2): 160-164.
Kang Can, Yang Minguan, Zhang Feng, et al. Energy distribution and statistic characteristics in round water jet[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 160-164. (in Chinese)
- 5 Rayleigh L. On the instability of jets[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1879, 10(4): 351-371.
- 6 Rayleigh L. On the capillary phenomenon of jets[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1879, 10(1): 4-13.
- 7 Weber C. Zum zerfall eines flüssigkeitsstrahles[J]. Z. Angew. Math. Mech., 1931, 2(11): 136-141.
- 8 Taylor G I. Generation of ripples by wind blowing over viscous fluids[C]//Taylor G I, Batchelor G K. The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1963, 3: 244-254.
- 9 Scheele G F, Meister B J. Drop formation at low velocities in liquid-liquid systems[J]. AIChE J, 1968, 14(1): 9-19.
- 10 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)

59 蔡祥,Walgenbach Martin, Doerpmund Malte,等. 基于电磁阀的喷嘴直接注入式农药喷洒系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 69 – 72.
Cai Xiang, Walgenbach Martin, Doerpmund Malte, et al. Direct nozzle injection sprayer based on electromagnetic-force valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 69 – 72. (in Chinese)

60 Taylor R, Fulton J. Sensor-based variable rate application for cotton[C]. Oklahoma Cooperative Extension Service. Oklahoma State University. Stillwater, Oklahoma, 2010.

61 Esau T, Zaman Q U, Chang Y, et al. Spot-application of fungicide for wild blueberry using an automated prototype variable rate sprayer[J]. Precision Agriculture, 2014, 15(2): 147 – 161.

62 Carrara M, Comparetti A, Febo P, et al. Spatially variable rate herbicide application on durum wheat in Sicily[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 387 – 392.

63 Nørremark M, Griepentrog H W, Nielsen J, et al. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 396 – 410.

64 胡开群,周舟,祁力钧,等. 直注式变量喷雾机设计与喷雾性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 70 – 74, 102.
Hu Kaiqun, Zhou Zhou, Qi Lijun, et al. Spraying performance of the direct injection variable-rate sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 70 – 74, 102. (in Chinese)

65 Sui R, Thomasson J A, Willers J L, et al. Variable-rate spray system dynamic evaluation[C]//2003 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 031128, 2003.

66 Crowe T G, Downey D, Giles D K, et al. An electronic sensor to characterize transient response of nozzle injection for pesticide spraying[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1): 73 – 82.

67 Hloben P. Study on the response time of direct injection systems for variable rate application of herbicides[D]. Bonn; Germany: University of Bonn, Institute of Agriculture Engineering, 2007.

68 Sharda A, Fulton J P, McDonald T P, et al. Real-time nozzle flow uniformity when using automatic section control on agricultural sprayers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 169 – 179.

(上接第 82 页)

11 周山明,金保升,孙志翱. 低压力大流量喷嘴液膜射流破碎长度[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(6): 539 – 542.
Zhou Shanming, Jin Baosheng, Sun Zhiao. Sheet breakup length of nozzle with large flow volume and lower pressure[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(6): 539 – 542. (in Chinese)

12 赵欣,张宝珍,赖维,等. 针型喷嘴雾化特性的影响因素分析[J]. 轻工机械, 2004(4): 22 – 24.
Zhao Xin, Zhang Baozhen, Lai Wei, et al. Effect factors of needle shape nozzle's spray characteristics[J]. Light Industry Machinery, 2004(4): 22 – 24. (in Chinese)

13 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.

14 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.

15 靳自霞,董宇红,周哲玮,等. 低速液体射流 Rayleigh 模式破碎的数值模拟[J]. 上海大学学报, 2008, 14(2): 161 – 167.
Jin Zixia, Dong Yuhong, Zhou Zhewei, et al. Numerical simulation of Rayleigh breakup in low-velocity liquid jet[J]. Journal of Shanghai University, 2008, 14(2): 161 – 167. (in Chinese)