

陆岱鹏,吕晓兰,雷晓晖,等. 超声雾化喷嘴的研究现状及在农业工程中的应用[J]. 江苏农业科学,2017,45(21):255-258.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.21.072

# 超声雾化喷嘴的研究现状及在农业工程中的应用

陆岱鹏,吕晓兰,雷晓晖,张美娜,易中懿

(江苏省农业科学院农业设施与装备研究所,江苏南京 210014)

**摘要:**超声雾化喷嘴主要有压电式和流体动力式 2 种形式,压电式超声雾化喷嘴适用于中、小流量的喷雾,其目标是对喷雾雾滴粒径的控制,期望得到雾化颗粒在微米级、粒径分布均匀的雾化微粒,在农业工程方面主要应用于超声雾化栽培及超低量喷药方面;而流体动力式超声雾化喷嘴雾化量大、结构简单、射程远、工作可靠,在农业设施加湿降温及设施内病虫害防治方面具有较好的应用前景。从超声雾化喷嘴的工作原理、研究现状及农业应用 3 个方面的研究成果进行评述。从超声雾化喷嘴的工作原理和研究现状可以得出,改变压电式超声雾化喷嘴的变幅杆形状和前后盖板的材料及改变流体动力式喷嘴的阀芯结构成为今后的重要发展方向。从雾化栽培、农业设施加湿降温及超低量喷药 3 个方面详细介绍了超声雾化喷嘴在农业工程方面的应用及特点。最后,对超声雾化喷嘴今后的研究方向进行了展望。

**关键词:**超声雾化;压电换能式;流体动力式;喷嘴;农业应用

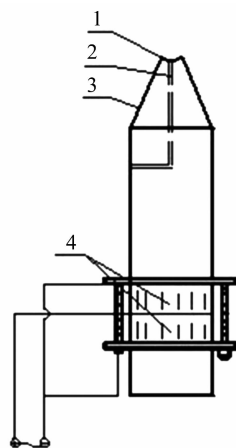
**中图分类号:** S491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)21-0255-04

超声雾化喷嘴主要有压电式和流体动力式 2 种形式,压电式超声雾化喷嘴产生的雾滴具有雾滴粒径细小、雾滴大小分布均匀、雾滴高度圆整性、相对较大的雾化量和液体输送压力低等优点<sup>[1]</sup>,因此被广泛地应用于雾化栽培<sup>[2]</sup>、超低量喷药<sup>[3]</sup>、药剂雾化治疗<sup>[4-6]</sup>、半导体刻蚀<sup>[7]</sup>、电子产品盐雾试验以及光谱分析、制备电子陶瓷薄膜和粉体、光学材料、贵金属材料等方面<sup>[8-9]</sup>。而流体动力式超声雾化喷嘴具有雾化量大、结构简单、射程远及工作可靠等优点,主要应用在高温燃烧<sup>[10]</sup>、工业除尘<sup>[11]</sup>及设施加湿降温等方面<sup>[12]</sup>。本文从超声雾化喷嘴的工作原理、研究现状及农业应用 3 方面研究成果展开评述。

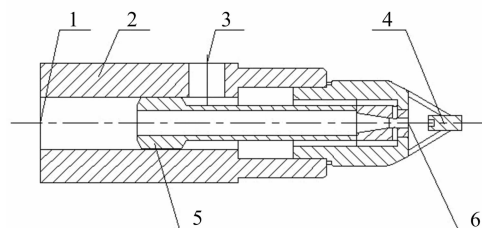
## 1 超声雾化喷嘴的结构

按发生超声波的声源不同来分,超声波雾化喷嘴可分为 2 类,即压电式和流体动力式。压电式超声雾化喷嘴的结构如图 1 所示,喷嘴由压电换能器和变幅杆组成,当液体到达喷嘴前端的雾化面时,受表面张力及亲和力的作用,在喷孔端口形成薄液层,薄液层在超声波振动下激起表面张力波,当振动面的振幅达到一定值时,液滴即从波峰上飞出而雾化<sup>[13]</sup>。

流体动力式超声雾化喷嘴的结构如图 2 所示,主要包括喷嘴和共振腔 2 个部分。空气压缩机射流出来的压缩空气经气管后,由进气口 1 流入超声雾化喷嘴内,再经过导流管 5 以很高的速度从喷嘴出口 6 射出,同时射入到共振腔内进而产



1—雾化面; 2—流道; 3—变幅杆; 4—压电换能器  
图1 压电式超声雾化喷嘴的结构



1—进气口; 2—喷嘴壳体; 3—进水口; 4—共振腔;  
5—导流管; 6—喷嘴出口  
图2 流体动力式超声雾化喷嘴的结构

收稿日期:2016-12-13

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(15)1033]。

作者简介:陆岱鹏(1987—),男,江苏滨海人,硕士,助理研究员,主要从事农业机械设计及仿真研究。Tel: (025) 84391123; E-mail: ludaipeng@163.com。

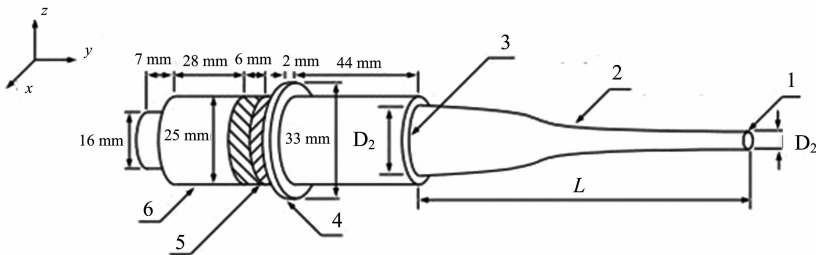
通信作者:易中懿,博士,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化技术与宏观发展政策研究。Tel: (025) 84391661; E-mail: yzy201@163.com。

生超声波。当进水口 3 供水后,也从喷嘴出口 6 射出,射流出来的水滴在超声波的作用下产生破碎<sup>[14]</sup>。

## 2 超声雾化喷嘴的研究现状

压电式超声雾化喷嘴的雾化面的振幅是决定雾化性能的

最主要参数<sup>[15]</sup>,因此通过设计雾化振子的母线形状及雾化振子的材料,可以增加振幅放大系数,提高喷嘴的雾化面的振幅是压电式超声雾化喷头研究的一个重要发展方向。流体动力式超声雾化喷嘴的雾化性能除了与喷嘴的气液比有关,喷嘴内部阀芯结构对雾化性能也有着显著的影响<sup>[16]</sup>,而优化喷嘴阀芯结构是改善其雾化性能的一个研究热点。

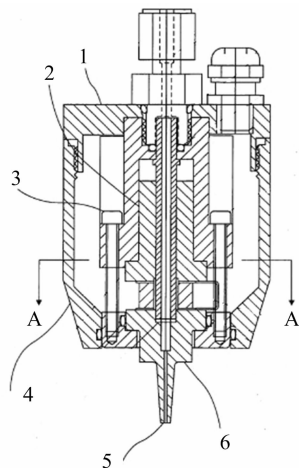


1—雾化面; 2—贝塞尔形变幅杆; 3—后端面; 4—法兰盘; 5—压电陶瓷圆片;  
6—郎之万换能器

图3 贝塞尔曲线形超声雾化喷头的结构

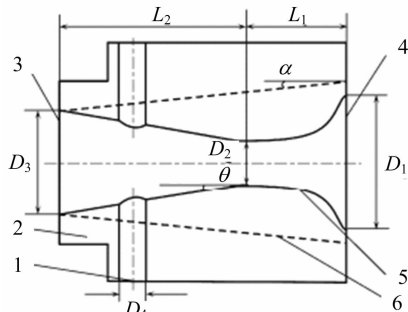
Sono-Tek 公司研制的超声波雾化喷嘴的结构如图 4 所示,该超声雾化喷嘴的前盖板 6 和后盖板 2 中,至少有 1 个是陶瓷材料制成。研究表明,声音在陶瓷材料中的传播速度是金属材料的 2.3~2.7 倍。当前、后盖板都采用金属材料时,喷嘴的振动频率最高可达 120 kHz,然而当前、后盖板采用陶瓷材料时,它的工作频率大大提高,可以达到 250 kHz。因此,对于一给定的液体,雾滴的数量中径下降了 0.61 倍。而且由于喷嘴频率的提高,喷嘴雾化端 5 的截面积也相应增加,所以该雾化喷嘴的雾化量也比一般金属的前、后盖板大得多,约可达到 600 mL/min<sup>[19]</sup>。

燕山大学的杨超等设计了一种基于拉瓦尔效应的超音速喷嘴,其结构如图 5 所示,适用于农业喷洒和植被降温领域,喷嘴的辅助气压为 0.3~0.6 MPa,水压为 0.1~0.4 MPa,雾滴粒径可达 18.52  $\mu\text{m}$ 。上述研究中还提出了流体动力式超声雾化喷嘴的阀芯结构对雾化性能有显著影响,拉瓦尔式喷嘴在雾化性能和效果上优于传统的锥形结构喷嘴,而优化喷嘴阀芯结构是改善其雾化性能的一个研究热点<sup>[20~21]</sup>。

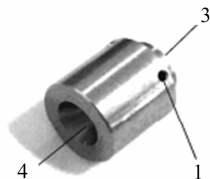


1—后罩盖; 2—后盖板; 3—紧固螺栓; 4—前罩盖;  
5—喷嘴雾化端; 6—前盖板

图4 陶基超声雾化喷头



a. 阀芯结构示意图



b. 阀芯结构实物

1—阀芯进口; 2—阀芯结构; 3—阀芯出口; 4—阀芯进气口;  
5—拉瓦尔结构; 6—锥形结构

图5 拉瓦尔阀芯结构

### 3 超声雾化喷嘴的农业应用

超声雾化被广泛地应用在雾化栽培、农业设施加湿降温、植物保护、超声喷涂、药剂雾化治疗、半导体蚀蚀、电子产品盐

台湾国立中兴大学精密工程研究所的 Wang 等设计了一种带有贝塞尔曲线形变幅杆的压电式超声雾化喷嘴,其具体的结构如图 3 所示,结果表明,在相同长度和相同雾化面积的情况下,带有贝塞尔曲线形变幅杆的压电式超声雾化喷嘴的振幅比传统的悬链式超声雾化喷嘴提高了 71%<sup>[17~18]</sup>。

雾试验以及光谱分析、制备电子陶瓷薄膜和粉体、光学材料、贵金属材料、高温燃烧场合等领域。本文着重介绍超声雾化在农业领域的应用及所采用的超声雾化喷嘴在形式和结构方面的特点。

### 3.1 雾化栽培

雾化栽培中植物根系生长在相对湿度为 100% 的空气中,氧气得以最大化供给,水、肥通过雾化方式提供,只要营养液配方正确,根系将处于最佳的水、气、肥环境中,使植物发挥出最大的生长潜能。与常规栽培模式相比,雾化栽培具有节水节肥、提高植物生长速度等优点,是速生高产、环境友好型的植物生产模式<sup>[22]</sup>。

江苏大学高建民等设计了一种桁架式超声雾化栽培器,其超声雾化喷头采用高频压电振子(图 6),工作频率为 180 kHz,直径为 12 mm,厚度为 1.5 mm,雾化量为 500 mL/h,驱动电压为 30 V<sup>[23]</sup>。江苏省农业科学院闻婧等设计了一种新型超声波雾化栽培装置,其超声雾化喷头为直径 20 mm、厚度 1.5 mm 的高频压电振子,雾化量为 3 L/h,功率为 250 W<sup>[24]</sup>。由上述研究可知,应用于超声雾化栽培的喷头多采用高频压电振子,具有结构简单、驱动电压低、可产生超细雾滴等优点,但是该雾化振子在高频振荡下容易达到疲劳极限,可靠性不高。

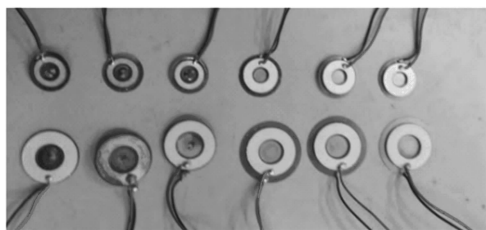


图6 高频压电振子

针对高频压电振子容易达到疲劳极限、可靠性不高的缺点,江苏大学农业工程研究院高建民等设计了工作频率为 28 kHz 的低频超声雾化栽培喷头及 60 kHz 的微型指数振子超声雾化喷头(图 7),28 kHz 的超声雾化喷头在 110 V 电压驱动下,雾滴体积中径为 162.3  $\mu\text{m}$ ,60 kHz 的超声雾化喷头在 36 V 电压驱动下,雾滴体积中径为 54.71  $\mu\text{m}$ ,2 种喷嘴的流量均为 35 mL/min,均能满足超声雾化栽培的要求,同时还提出压电式超声雾化喷嘴的变幅杆结构对雾化性能有显著影响,指数形变幅杆在雾化性能和效果上优于传统的锥形结构喷嘴,而优化变幅杆结构是改善其雾化性能的一个研究热点<sup>[25-27]</sup>。

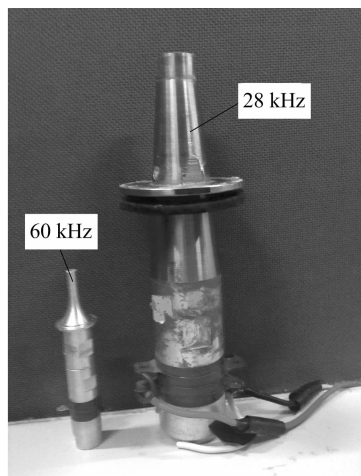
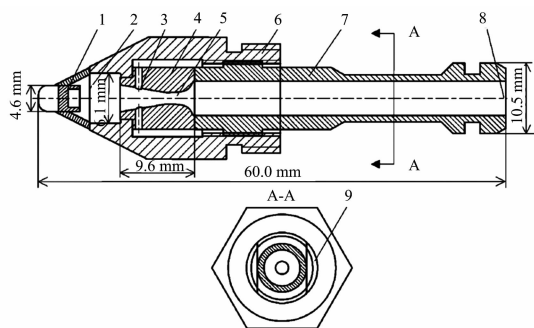


图7 28、60 kHz 超声雾化喷头实物

### 3.2 农业设施加温降温

我国南方大部分地区夏季气温高,室外温度常在 30  $^{\circ}\text{C}$  以上,且持续时间较长,因此常使得南方农业设施内部温度超过 40  $^{\circ}\text{C}$ ,对设施内的多数农作物造成高温影响,很大程度上限制了作物的正常生长,不利于南方农业设施的发展。南方农业设施夏季降温已成为一个亟待解决的问题。喷雾降温技术不但能够迅速降低环境温度,而且能够使空气中含有大量的负离子,增加空气湿度的同时,还可以净化空气,优化环境<sup>[28]</sup>。喷雾降温的方式主要有高压喷雾和超声喷雾,高压喷雾存在对水质要求较高,且须要经常对喷嘴进行清洗等维护工作的缺点,而超声喷雾采用的是流体动力式超声雾化喷嘴,其结构简单,雾化量大,射程远,雾滴粒径小,可达到十几微米,能迅速弥漫整个设施内部,起到加温降温的效果<sup>[29]</sup>。

太原理工大学刘旭泽等设计了流体动力式超声雾化喷嘴(图 8),其辅助气压为 0.3 ~ 0.6 MPa,水压为 0.1 ~ 0.4 MPa,气压由 0.3 MPa 升到 0.5 MPa 时,雾滴粒径由几十微米迅速降低到十几微米,但是从 0.5 MPa 升到 0.6 MPa 时,雾滴粒径基本没有差异<sup>[30]</sup>。



1—振动腔;2—喷嘴出口;3—阀芯出水口;4—阀芯结构;5—拉瓦尔结构;6—连接套管;7—导管;8—进气口;9—进口水口

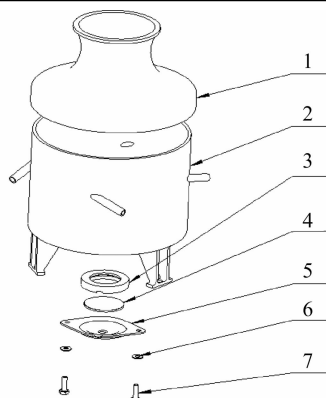
图8 雾化喷嘴几何结构

### 3.3 超低量喷雾

超低容量精确喷雾技术可以提高农药的利用率,减少农药使用量,可实现 0.5 mL/ $\text{m}^2$  的施药量,雾滴大小在 5 ~ 50  $\mu\text{m}$  范围内<sup>[31-33]</sup>。华南农业大学数学与信息学院张建桃等根据超声雾化换能器的工作原理和农药喷施对换能器提出的雾化要求设计了一种频率为 1.53 MHz 的农用超声雾化换能器,它由文氏管、容腔、橡胶垫圈、超声振子、法兰盖、平垫圈和螺栓等零件组成(图 9)。其中,超声振子由压电陶瓷圆片和不锈钢薄片组成。换能器超声振子的直径为 25 mm,厚度为 1.2 mm。试验结果表明,93% 的雾滴颗粒直径分布在设定的 3 ~ 5  $\mu\text{m}$  范围内,可实现超低容量喷雾<sup>[34]</sup>。

### 4 超声雾化喷嘴的前景展望

本文从超声雾化喷嘴的工作原理、研究现状及农业应用 3 个方面的研究成果进行评述,着重介绍了超声雾化喷嘴在雾化栽培、农业设施加温降温及超低量喷雾 3 个方面的应用。综合国内外研究学者对超声雾化喷嘴的研究进展及农业应用总结出以下几个研究方向:(1)对压电式超声雾化喷嘴的变幅杆进行优化设计,提高喷嘴雾化面的振幅,可以得到超细雾滴。(2)由于声波在陶瓷材料中的传播速度是金属材料的



1—文氏管；2—容腔；3—橡胶垫圈；4—超声振子；  
5—法兰盖；6—平垫圈；7—螺栓  
图9 农用超声雾化换能器的结构分解

2.3 ~ 2.7 倍,故当前、后盖板都采用陶瓷材料时,它的工作频率大大提高;由于声波在硅中的传播速度比在金属材料中快,且可以用微机电系统 (MEMS) 进行大规模地制造,故基于硅的高频超声雾化喷嘴也是压电式喷嘴的发展趋势。(3) 在喷嘴气液比恒定的情况下,流体动力式超声雾化喷嘴的阀芯结构对雾化性能有显著影响,优化喷嘴阀芯结构是改善其雾化性能的一个研究热点。(4) 结合压电式超声雾化喷嘴及流体式超声雾化喷嘴的优点,设计压电二相流超声雾化喷嘴是一种新的发展方向。它能够在低能耗的情况下产生大量的超细雾滴,以克服传统技术无法同时兼顾雾化量大、雾滴粒径细、能耗低、射程远及定向喷雾不足等缺点。

#### 参考文献:

- [1] Rajan R, Pandit A B. Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomization[J]. Ultrasonics, 2001, 39(4): 235 - 255.
- [2] 徐伟忠, 王利炳, 詹喜法, 等. 一种新型栽培模式——气雾培的研究[J]. 广东农业科学, 2006(7): 30 - 33.
- [3] 张建桃, 文 晟, 江定心, 等. 超声雾化在超低量喷雾中的应用前景[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(10): 67 - 70.
- [4] Gareth M F, James F. Production of biodegradable nano and micro particles via ultrasonic atomization for biopharmaceutical delivery [C]. Proceedings of the 2006 WSEAS Int, 2006: 128 - 130.
- [5] Ho J, Wang H, Forde G M. Process considerations related to the microencapsulation of plasmid DNA via ultrasonic atomization[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, 101(1): 172 - 181.
- [6] Zhang Z G, Cai L C. Medical ultrasonic atomizer design parameters analysis [C]. International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. IEEE, 2010: 1519 - 1522.
- [7] 马海力. 纳米结构 ZnO 超声雾化热解喷涂法制备与掺杂特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [8] 黄卫星. 超声雾化试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
- [9] 向 东, 瞿德刚, 牟 鹏, 等. 节省光刻胶的超声雾化喷涂工艺圆锥特性研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 13 - 20.
- [10] 王建勋. 流体动力式超声波燃油燃烧器的雾化特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [11] 王光旭, 徐国栋, 刘文婧, 等. 应用电声换能超声雾化方法提高超细颗粒捕集效率[J]. 环境工程学报, 2013, 7(1): 294 - 300.
- [12] 戴丽燕, 王东军, 郝文阁. 超声雾化增湿降温强化高比电阻粉尘静电收尘效果[J]. 有色矿冶, 2016, 32(5): 48 - 51.

- [13] 高建民, 任 宁, 顾 峰, 等. 低频超声雾化喷头优化设计及试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 1 - 4.
- [14] 刘旭泽. 超声雾化喷嘴的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [15] Vukasinovic B, Smith M K, Glezer A. Mechanisms of free surface breakup in vibration - induced liquid atomization[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(1): 13 - 20.
- [16] Gerdroodbary M B, Jahanian O, Mokhtari M. Influence of the angle of incident shock wave on mixing of transverse hydrogen micro - jets in supersonic crossflow [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(30): 9590 - 9601.
- [17] Wang D A, Chuang W Y, Hsu K, et al. Design of a bézier - profile Horn for high displacement amplification[J]. Ultrasonics, 2011, 51(2): 148 - 156.
- [18] Roopa Rani M, Rudramoorthy R. Computational modeling and experimental studies of the dynamic performance of ultrasonic Horn profiles used in plastic welding [J]. Ultrasonics, 2013, 53(3): 763 - 772.
- [19] Harvey L B, Park H, Mowbray D F. Ultrasonic atomizing nozzle and method: US7712680 [P]. 2010 - 05 - 11.
- [20] 杨 超, 陈 波, 姜万录, 等. 基于拉瓦尔效应的超音速喷嘴雾化性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 57 - 64.
- [21] 王 平, 刘学山, 乔立民. 轴对称拉瓦尔喷管流场分析[J]. 飞机设计, 2013, 33(2): 23 - 26.
- [22] 汤 静. 中、低频超声雾化栽培系统关键部件设计及雾培试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [23] 高建民, 黄桂珍, 尹文楚, 等. 桁架式超声雾化栽培器的雾滴沉降和根际温湿度变化规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 185 - 192.
- [24] 闻 婧, 程瑞峰, 孟力力, 等. 超声波雾化栽培装置的研制和应用效果[J]. 江西农业学报, 2012, 24(1): 23 - 25.
- [25] 高建民, 陆岱鹏, 刘昌鑑, 等. 微型指数振子低频超声雾化喷头的研制及喷雾试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 40 - 46.
- [26] 任 宁. 基于聚焦式超声悬浮的低频超声雾化喷头仿真及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- [27] 任 宁, 高建民. 低频超声雾化栽培喷头阻抗特性的数值模拟 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 115 - 118.
- [28] 万正林, 李立志, 邓俭英, 等. 南方农业设施常用降温方法及其基本原理[J]. 广西农业科学, 2010, 41(7): 739 - 741.
- [29] 陈昭辉, 刘媛媛, 吴中红, 等. 喷雾与纵向负压通风相结合的封闭牛舍降温效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 211 - 218.
- [30] 刘旭泽, 高贵军. 基于 Hartmann 哨超声喷嘴的雾化特性研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(3): 268 - 272.
- [31] 周海燕, 杨炳南, 靳荷荣, 等. 我国高效植保机械应用现状及发展展望[J]. 农业工程, 2014, 4(6): 4 - 6.
- [32] Ferguson J C, Gaussoin R E, Eastin J A, et al. Effect of application carrier volume on a conventional sprayer system and an ultra - low volume sprayer[J]. Pesticide Formulation and Delivery Systems, 2014, 23: 13 - 22.
- [33] Ferguson J C, Gaussoin R E, Eastin J A, et al. Comparison of herbicide efficacy and adjuvants using a conventional sprayer and an ultra - low volume sprayer[J]. Pesticide Formulation and Delivery Systems, 2014, 33: 23 - 25.
- [34] 张建桃, 李晟华, 文 晟, 等. 农用超声雾化换能器参数优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 8 - 15.