学校代码：11078　　学　　号：2112107096

广州大学
硕士学位论文

题目：高粘度流体超声空化雾化研究

学生类型：□学术学位硕士
☑专业学位硕士

学位论文作者：曾耀华
导师姓名及职称：桂珍珍　副教授
学　　院：机械与电气工程学院
学科专业：机械工程
论文提交日期：二〇二四 年 五 月

中国知网 https://www.cnki.net

学校代码：11078　　学　　号：2112107096

广州大学硕士学位论文

高粘度流体超声空化雾化研究

The Study of Ultrasonic Cavitation Atomization of High-viscosity Liquids

曾耀华

学　科　专　业：机械工程

研　究　方　向：压电流体驱动技术

论文答辩日期：2024年5月26日

指导教师（签名）：

答辩委员会主席（签名）：

答辩委员会委员（签名）：

中国知网　https://www.cnki.net

摘 要

超声雾化是通过高频振动破坏流体的连续性，将连续流体分裂成微小颗粒的过程，即单相流变为多相流的过程。超声雾化因其具有耗能低、效率高、雾化粒径小、结构简单以及成本低等优点，被广泛应用于生物医疗、先进机械制造、先进纳米材料和环境保护等领域，已经成为了制备气溶胶的重要技术。

低粘度流体的超声雾化技术已经相当成熟，但是关于吸入式药液等高粘度流体超声雾化的研究却非常有限。高粘度流体雾化由于流体的特性，需要高能量的供给，而单一振动维度很难实现高能量的聚集。因此目前使用的超声雾化器难以雾化粘度超过 10 cP 的流体。但是低粘度流体的超声雾化已不能满足行业发展的需求，所以亟需一种高粘度流体的超声雾化装置。本团队基于二维振动能量输入，首次提出流管雾化。本文将重点剖析流管型雾化器的雾化机理，基于此原理研制相关设备并验证其在雾化高粘度流体时的特征和性能。证明流管型雾化器雾化过程中发生空化效应，并分析空化参数对雾化性能的影响。本研究从理论分析、仿真分析与实验验证研究等方面开展，研究内容如下：

（1）从空化效应理论出发解析流管型雾化器的整体结构和各组成部分。结合雾化流管的振动特性和牛顿第二定律推导出空化核在位移稳态响应下的受力。简化空化阈值公式，并与流体粘度建立联系。根据能量守恒定律，结合位移稳态响应下空化核受力，推导空化核瞬时崩溃压力，建立流管型雾化器的工作原理。

（2）基于流管型雾化器工作原理进行有限元仿真，分析空化核溃灭的瞬时崩溃压力。搭建实验平台，进行流管型雾化器常温下的阻抗分析实验和雾化速率实验，探究高粘度流体雾化的特征和性能，验证流管型雾化器相关理论分析和有限元仿真的正确性。

（3）根据超声空化效应使流体乳浊化而改变吸光度的原理，进行全光谱分析实验，分析雾化流管内雾化前后的光强变化，以此验证流管型雾化器在雾化过程中发生空化效应。进行雾化流管的空化雾化分析，观察流体与管壁接触区域的变化。分析甘油混合物经过流管型雾化器雾化前后的拉曼光谱，探究流管型雾化器的雾化稳定性。

（4）对流体进行加热和搅拌两种处理来影响空化性能，分析上述处理对流管型雾化器雾化速率的影响。证明加热和搅拌来提高空化效应可以有效地雾化速率和雾化粘度。最后对流体加热和搅拌后的雾化颗粒进行测试，并对雾化前后流体的拉曼光谱进行分析。

关键词：超声雾化；雾化机理；生物医疗；高粘度流体；流管型雾化器

中国知网 https://www.cnki.net

ABSTRACT

Ultrasonic atomization is through high-frequency vibration to destroy the continuity of the liquid, the continuous liquid will be split into tiny particles of the process, namely, single-phase flow into multi-phase flow process. Ultrasonic atomization has become an important technology for the preparation of aerosols due to its advantages of low energy consumption, high efficiency, small atomized particle size, simple structure, and low cost, which is widely used in the fields of biomedicine, advanced machinery manufacturing, advanced nanomaterials, and environmental protection.

Ultrasonic atomization of low-viscosity liquids is quite mature. However, research on ultrasonic atomization of high-viscosity liquids such as inhaled medicinal liquids for life forms is very limited. Atomization of high-viscosity liquids requires a high energy supply due to the characteristics of the liquid, and it is difficult to achieve a high energy aggregation with a single vibration dimension. Therefore, the currently used ultrasonic atomizers have difficulty in atomizing liquids with viscosities exceeding 10 cP. However, ultrasonic atomization of low-viscosity liquids has been difficult to meet the needs of industry development, so there is a need for a high-viscosity liquid ultrasonic atomization device. Our team has first proposed the flow atomization based on two-dimensional vibrational energy input. This paper will focus on analyzing the atomization mechanism of the flow tube atomizer, developing related equipment based on this principle and verifying its characteristics and performance in atomizing high-viscosity liquids. It is proved that the cavitation effect occurs during the atomization process of the flow tube type atomizer, and the influence of the cavitation parameters on the atomization performance is analyzed. This study is carried out from theoretical analysis, simulation analysis and experimental verification. The research content is as follows:

(1) Explanation of the overall structure and components of the flow tube atomizer from the cavitation effect theory. Combining the vibrational properties of the atomized flow tube and Newton's second law to derive the forces on the cavitation nucleus under the displacement steady state response. Simplifying the cavitation threshold equation and making the connection to the viscosity of the liquid. According to the law of energy conservation and the force on the cavitation nucleus under the displacement steady state response, the instantaneous collapse

中国知网 https://www.cnki.net

pressure of the cavitation nucleus is deduced to establish the working principle of the flow tube type atomizer.

(2) The finite element simulation based on the working principle of the flow tube type atomizer is performed to analyze the collapse pressure released when the cavitation nucleus collapses. The experimental platform for the performance test of the flow tube atomizer is built, and the impedance analysis experiment and atomization rate experiment of the flow tube atomizer at room temperature are carried out to investigate the characteristics and performance of the atomization of high-viscosity liquids in the flow tube atomizer, and to validate the correctness of the relevant theoretical analysis and finite element simulation of the flow tube atomizer.

(3) According to the principle that the ultrasonic cavitation effect emulsifies the liquid and changes the absorbance, a full-spectrum analysis experiment was carried out to analyze the change of light intensity before and after atomization in the atomized flow tube, so as to verify that the flow tube atomizer undergoes the cavitation effect in the process of atomization. Cavitation atomization analysis of an atomized flow tube is performed to observe the changes in the region of contact between the liquid and the wall of the tube. The Raman spectra of glycerol mixtures before and after atomization by a flow tube atomizer were analyzed to investigate the atomization stability of the flow tube atomizer.

(4) The cavitation properties are affected by two treatments of the liquid, heating and stirring, to analyze the effect of the above treatments on the atomization rate of the flow tube atomizer. It is proved that increasing the cavitation effect by heating and stirring can effectively improve the atomization rate and atomization viscosity of the flow tube atomizer. Finally, the atomized particles of the liquid after heating and stirring are tested and the Raman spectra of the liquid before and after atomization are analyzed.

Keywords: Ultrasonic atomization; Atomization mechanism; Biomedical; High-viscosity liquids; Flow tube atomizer

中国知网 https://www.cnki.net

目　录

第一章 绪论.....1
1.1 研究背景及意义.....1
1.2 超声雾化器的国内外研究现状.....3
1.2.1 声表面波原理型雾化器.....3
1.2.2 静态网孔原理型雾化器.....5
1.2.3 动态网孔原理型雾化器.....6
1.3 高粘度流体超声雾化的研究现状.....8
1.4 高粘度流体超声雾化的应用.....10
1.5 超声雾化器的空化效应.....12
1.6 研究内容.....13
第二章 流管型雾化器的结构与理论建立.....15
2.1 流管型雾化器的结构.....15
2.2 流管型雾化器的理论推导.....18
2.2.1 雾化流管理论建立.....19
2.2.2 流管型雾化器的空化理论推导.....20
2.3 本章小结.....24
第三章 超声空化有限元分析与雾化性能测试.....25
3.1 超声空化有限元分析.....25
3.2 流管型雾化器的雾化性能测试.....26
3.2.1 流管型雾化器实验平台搭建.....27
3.2.2 流管型雾化器阻抗测试.....28
3.2.3 雾化速率实验.....30
3.3 本章小结.....33
第四章 流管型雾化器的空化效应验证.....35
4.1 全光谱分析.....35
4.1.1 全光谱分析原理.....35
4.1.2 全光谱分析实验.....36
4.2 空化雾化观测实验.....39
4.3 雾化前后流体拉曼分析.....41
4.4 本章小结.....43
第五章 空化参数对雾化性能的影响.....45
5.1 流体温度和搅拌速率对空化的作用.....45
5.2 流体温度对雾化性能的影响.....47
5.2.1 流体温度对雾化速率的影响.....48

中国知网 https://www.cnki.net

5.2.2 流体温度对雾化颗粒的影响.....51
5.2.3 流体温度对雾化前后拉曼光谱的影响 53
5.3 流体搅拌速率对雾化性能的影响 54
5.3.1 流体搅拌速率对雾化速率的影响.....56
5.3.2 流体搅拌速率对雾化颗粒的影响.....58
5.3.3 流体搅拌速率对雾化前后拉曼光谱的影响 60
5.4 本章小结.....61
第六章 总结及展望 63
6.1 本文工作总结.....63
6.2 本文创新点.....64
6.3 研究展望.....65
参考文献.....66

中国知网 https://www.cnki.net

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

雾化是指利用外部能量将连续的流体分散为微小雾状颗粒或气溶胶的过程。通过雾化，流体能更均匀地分散和传播，从而实现更高效的应用。雾化广泛应用于医疗[1]、农业[2]、工业[3]等领域，并为这些领域带来了新的机遇和挑战。随着科学技术的不断发展和人们生活水平的提高，雾化的应用领域日益扩大。在呼吸道疾病治疗中，雾化吸入治疗可以直接作用于病灶，因此与传统口服及静脉注射用药相比，具有用药量低、机体损伤小、作用速度快等优势[4]。在室外施工现场，高压喷雾系统可以增加环境湿度，吸附空气中的杂质，以达到加湿降尘的效果[5]。在汽车喷涂作业中，高压喷涂机通过将涂料雾化成微小颗粒，实现在汽车表面均匀涂布，提高喷涂效果和质量[6]。在美容保养行业中，负离子美容仪将水珠分解成细微雾状粒子，释放负离子，从而扩张皮肤毛孔，使雾滴能够渗透至皮肤的基底层，皮肤可以有效地吸收雾化后的水滴，实现补水和保湿的效果，进而促进肌肤健康和恢复年轻状态[7]。在农业生产中，喷雾灌溉设备将水雾化成微小颗粒，使其更容易吸附在农作物表面，提高水分利用效率[8]。

常见的雾化技术包括压力气动雾化[9]、压力-热联合雾化[10]及超声雾化[11]。由于加热可能导致流体化学性质发生改变，因此压力气动雾化和超声雾化技术最为常见。然而，压力气动雾化难以控制液滴粒径的分布，在对颗粒尺寸要求较高的场合无法应用。超声雾化因其具有能量转换率和利用率高，雾化颗粒分布可控且粒径小，液滴出口速率低，结构简单以及成本低等优点[12]，在医疗领域逐渐成为主流。与传统压力雾化技术相比，超声雾化利用具有逆压电效应的特性材料产生高频振动，将大颗粒水滴转化成微小的气溶胶。因此超声雾化被广泛运用于生物医疗[13]、先进机械制造[14]、先进纳米材料[15]及环境保护[16]等多个领域。

超声雾化对比于传统的压力雾化和热雾化，是一种高效、便捷并且得到广泛应用的雾化技术。但是超声雾化也存在着许多问题，包括颗粒度难以控制，雾化量小，压电材料加工工艺复杂，难以精确调节谐振频率等。并且，在超声雾化的过程中，超声波在高频振动时会引起剧烈的声波和热效应，这可能会对流体的成分和活性产生影响。此外，超声雾化器受限于雾化流体的低粘度，限制了其更广泛的应用。为了解决超声雾化器存在的问题，研究者们从超声雾化器的结构和雾化机理出发，开发了多种不同类型的超声

中国知网 https://www.cnki.net

雾化器。

超声雾化的雾化机理目前主要可以分为两种，一种是声表面波雾化机理，在超声低频的激励下，在平衡状态下的流体受到连续振动干扰时，毛细波变得不稳定而导致毛细波的波峰断裂，形成雾滴[17]。另一种是微穿孔面外振动雾化机理，利用微穿孔板的面外振动，促使流体在振动的干扰下从微穿孔板的一侧通过微孔，在微穿孔板的一侧被挤压形成雾滴而雾化[18]。根据以上超声雾化的两种雾化机理，超声雾化器可以具体细分为三大类[19]，分别是声表面波雾化器、静态网孔雾化器和动态网孔雾化器。声表面波雾化器的雾化机理为声表面波机理，网孔雾化器的雾化机理为微穿孔面外振动。超声雾化器的分类如图 1-1 所示。

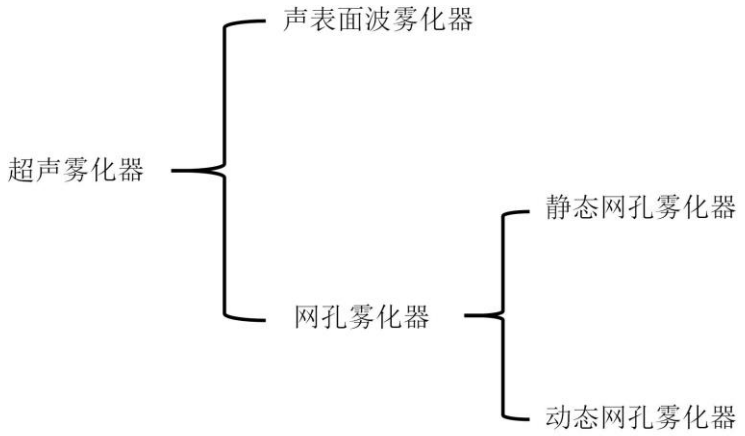


图 1-1 超声雾化器的分类[19]

Fig. 1-1 Classification of ultrasonic atomizers[19]

低粘度流体的超声雾化技术已经相当成熟，但是关于生命体吸入式药液等高粘度流体超声雾化的研究却非常有限。目前关于高粘度流体超声雾化的研究大多是以声表面波雾化器和网孔雾化器的雾化机理为基础，通过增大驱动电压或驱动频率来提高作用于流体的能量，将高粘度流体分散实现雾化；或者是在声表面波雾化器和网孔雾化器的结构基础上，通过增加变幅杆来提高单位能量密度，将少量高粘度流体打散实现雾化。但是，声表面波雾化器的原理是将振动能量施加到整个流体系统中，难以实现能量的集中。静态网孔雾化器工作产生的压力，导致流体通过微细网孔时消耗了大部分能量。而动态网孔雾化器的网孔直径较小，流体通过锥孔时会受到较大阻力，网孔振动时难以提供足够的能量来克服这种阻力。因此在声表面波雾化器和网孔雾化器的基础上提供单一能量的供给很难实现高能量的聚集。所以利用不同的雾化机理设计超声雾化器，将是未来高粘度流体雾化的研究方向。

中国知网 https://www.cnki.net

1.2 超声雾化器的国内外研究现状

1.2.1 声表面波原理型雾化器

声表面波雾化的原理是利用声表面波在介质中传播的特性。当流体与介质相互接触，且受到交流信号的驱动时，声表面波会作用于平衡状态的流体。在声表面波的作用下，流体的表面张力受到破坏，导致毛细波的波峰断裂，从而使液滴被分散飞离液面，实现雾化。

1995 年，日本学者 Kurosawa 等人[20]为了满足超声雾化器小型化和便于携带的应用需求，首次设计了一种尺寸为口袋大小的声表面波原理型雾化装置，如图 1-2 所示。该声表面波原理型雾化装置主要由振动器、盖板和胶管组成。振动器的材料是具有逆压电效应的 $LiNbO_3$，在交流信号的驱动下能产生高频振动。利用声表面波作为泵送的驱动力，将流体泵送至雾化区域，并在驱动频率为 10 MHz 时，实现速率为 0.6 ml/min 的超声雾化，雾化颗粒直径为 19 μm。这项研究成为了声表面波雾化器开创性的标志，第一个声表面波雾化器由此诞生。

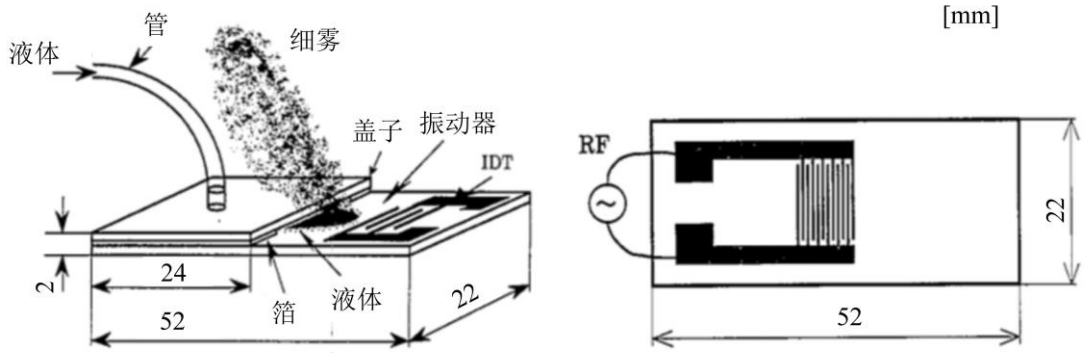


图 1-2 声表面波雾化装置[20]

Fig. 1-2 Surface acoustic wave atomization device[20]

2010 年，日本学者 Yamagata[21]将声表面波原理型的超声雾化器与静电沉积技术相结合，提出了一种蛋白质微观图案的制作方法。声表面波雾化和静电沉积系统如图 1-3 所示。其中声表面波雾化器由铌酸锂晶体衬底和平面叉指电极组成，当叉指电极受到射频信号激励时产生声表面波作用于流体而雾化。在雾化过程中，利用带有反射器的声表面波雾化器雾化流体以降低温度，避免蛋白质结构被破坏。并且，在交流信号驱动频率为 50 MHz 时，该雾化器的雾化颗粒直径约为 2.2 μm。该研究将声表面波原理型雾化器

中国知网 https://www.cnki.net

成功应用于芯片免疫分析和生化图层等微观图案的制造领域。

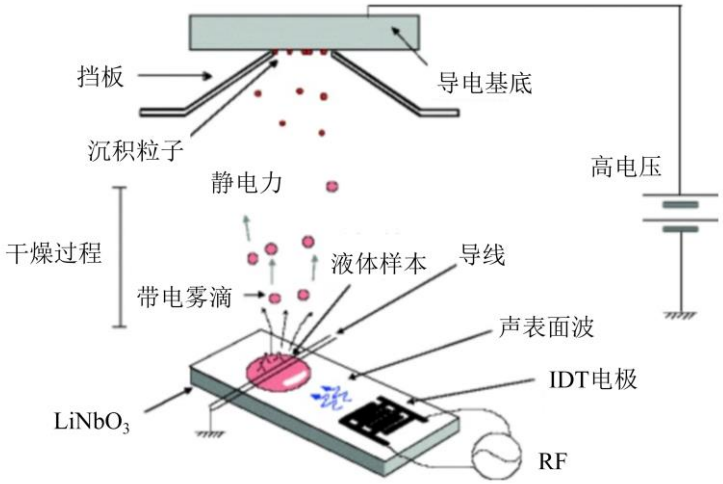


图 1-3 声表面波雾化和静电沉积系统[21]

Fig. 1-3 Acoustic surface wave atomized electrostatic deposition system[21]

2022 年，Huang 等人[22]利用光刻技术在厚度为 0.5 mm 的 $LiNbO_3$ 基板上制造声表面波激发器件，提出一种利用微流控通道实现药物雾化的方法，如图 1-4 所示。该装置可以在 60 MHz 的驱动频率以及 5.26 W 的输出功率下实现低粘度药物输送和有效雾化。该研究也为声表面波原理型雾化器应用于哮喘和慢性阻塞性肺病的吸入式治疗提供了重要的参考。

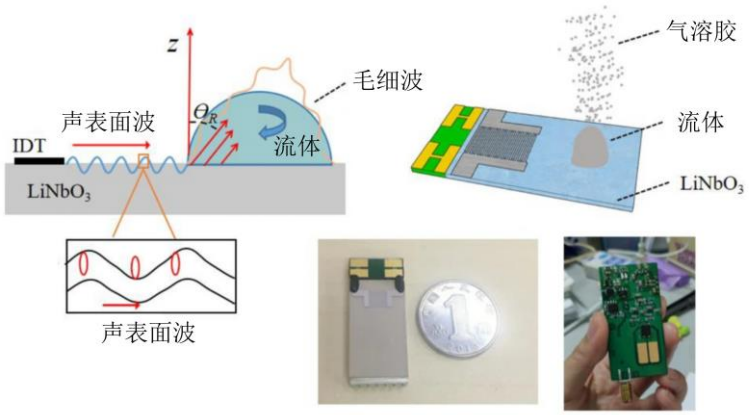


图 1-4 声表面波雾化药物[22]

Fig. 1-4 Surface acoustic wave atomization of medicine[22]

综上，声表面波原理型雾化器具有结构简单、雾化颗粒直径小和雾化量大等优点，使其得到广泛的应用。但声表面波雾化器的工作机理是将振动能量施加到整个流体系统中，从而导致能量利用率低、雾化颗粒分布不集中、雾化粘度低和雾化过程不可控。因此，在雾化颗粒分布集中和药物粘度高的吸入式治疗中无法得到应用。

中国知网 https://www.cnki.net

1.2.2 静态网孔原理型雾化器

为了解决声表面波雾化器能量密度低的问题，研究者们在压电驱动的基础上研发了网孔雾化器。网孔雾化器又根据其振动方式细分为静态网孔雾化器和动态网孔雾化器。静态网孔雾化器主要由压电陶瓷元件、细微网孔板、壳体组成。在压电陶瓷的高频振动下，流体被反复挤压并且向网孔板的微孔施加压力，使得流体通过微细网孔而形成雾滴。由于在整个雾化过程中，网孔板不会发生形变，所以将这类超声雾化器统称为静态网孔雾化器。

1999 年，瑞士学者 Heij 等人[23]首次提出了一种微米级锥形孔喷嘴超声雾化装置，如图 1-5 所示。装置的一侧是一个圆形驱动器，其上粘接压电振子，另一侧是一个由硅微机械加工技术制造的锥形孔喷嘴，在这两侧之间是一个容积可以改变的腔体。当压电振子被激励时，产生的超声压力波向锥形孔的方向传播，使流体从锥形孔中喷出，实现雾化的效果。该雾化器的诞生为超声雾化提供了新的雾化机理，也为后续网孔雾化器的研究提供了研究参考和方向。

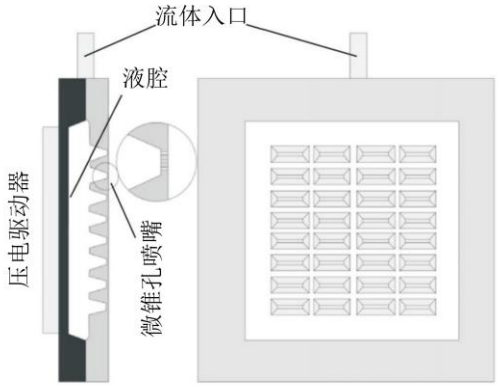


图 1-5 第一个静态网孔雾化器[23]

Fig. 1-5 The first static mesh atomizer[23]

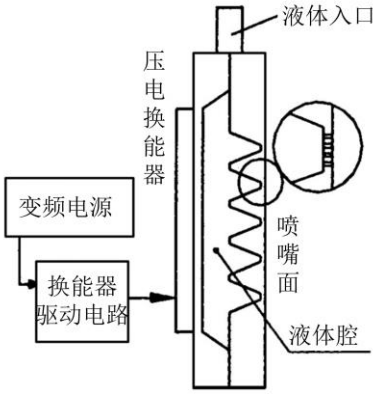


图 1-6 压电驱动微孔喷雾系统[24]

Fig. 1-6 Piezo-driven microporous spray system[24]

2002 年，王国辉等人[24]为了使超声雾化器能够高效产生适合于雾化吸入治疗的气溶胶，设计出一种压电驱动微孔喷雾系统，如图 1-6 所示。该喷雾系统的喷嘴面采用硅微机械加工技术制作而成。通过实验证明，雾粒直径主要取决于微孔直径大小。微孔直径越大，驱动电压越大，谐振频率越小，雾粒直径越大。并且在驱动电压为 80 V，驱动频率为 36 kHz 时测得雾化颗粒的平均直径为 9.94 μm，该雾化器的雾化颗粒尺寸适合吸入式治疗。

2006 年，法国学者 Vecellio 等人[25]开发了一种静态网孔的医用雾化器，如图 1-7 所

中国知网 https://www.cnki.net

示。该雾化器由手柄、压电陶瓷、储液槽和微孔板组成。在驱动频率为 180 kHz 时，锥形压电陶瓷将药液推向静态网，药液经过细微网孔分离形成可供人体吸入的气溶胶。该研究将网孔雾化器颗粒度分布集中的优点成功应用于医疗领域。

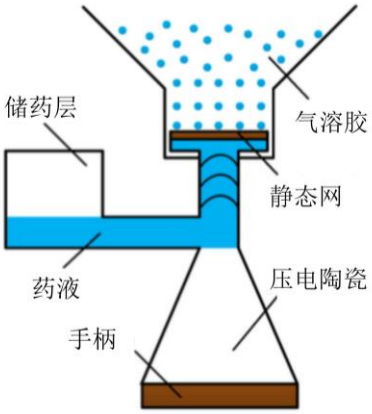


图 1-7 静态网孔医用雾化器[25]

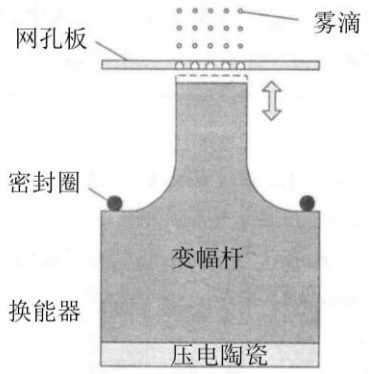


图 1-8 超声变幅杆网孔雾化结构[26]

Fig. 1-7 Static mesh medical atomizer[25]

Fig. 1-8 Ultrasonic horn mesh atomization structure[26]

2008 年，朱寅等人[26]提出一种超声变幅杆网孔雾化结构，如图 1-8 所示。超声波换能器由压电陶瓷和变幅杆粘接而成，变幅杆浸入药液中。当压电陶瓷基底受到交流电压激励时，压电陶瓷基底产生高频微幅振动并经过变幅杆放大后，将流体从网孔板上的微孔挤出，最终将大颗粒流体分散成微小雾滴而实现雾化。该雾化器可以将压电陶瓷的能量通过变幅杆集中放大，有效地解决静态网孔雾化器工作压力难以集中的问题。

综上，静态网孔雾化器具有结构简单、雾化稳定和雾化面积大等优点，在医疗、农业、食品和化工等领域得到广泛应用。但是，静态网孔雾化器的原理是压电陶瓷工作时产生的压力波向前传递，使流体通过微细网孔而雾化，该过程通常需要施加较高的工作压力。同时，粘度较高的流体无法通过细微网孔分离成微小颗粒。因此，静态网孔雾化器需要施加较高的工作压力和雾化粘度低的缺点，限制其在经肺给药和吸入式基因治疗等高粘度流体雾化领域的应用。

1.2.3 动态网孔原理型雾化器

动态网孔雾化器的工作原理是带有微小锥孔的网孔板随压电振子发生周期振动，使流体在微孔中反复被挤压剪切形成细小颗粒而实现雾化。由于在整个雾化过程中，网孔板会随压电振子发生形变，所以将这类超声雾化器统称为动态网孔雾化器，其雾化原理如图 1-9 所示[27]。动态网孔雾化器的结构相对简单，通常由振动网孔板、压电陶瓷环和

中国知网 https://www.cnki.net

腔体组成。压电陶瓷环粘接在振动网孔板上，网孔板的一侧与液体接触，另一侧与外界环境相接。当压电振子受到交流电压激励时，网孔板随着压电振子做周期性往复运动，微小锥孔的孔径随着网孔板振动而变化，流体在毛细力的作用下反复破碎，实现雾化。

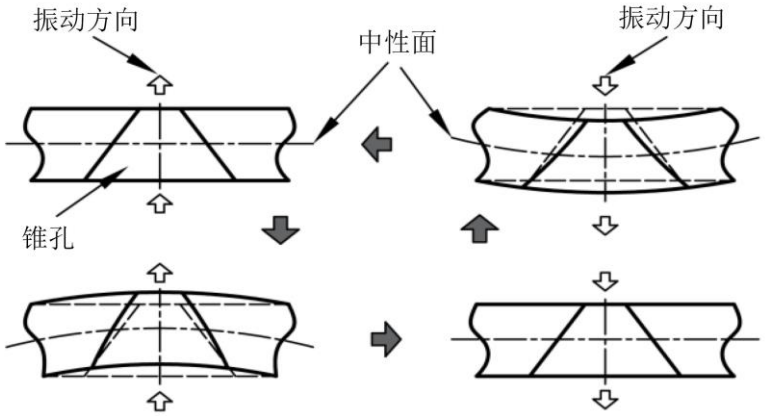


图 1-9 动态网孔雾化原理[27]

Fig. 1-9 Principle of dynamic mesh atomization[27]

2011 年，张建辉等人[28]为改善雾化片的雾化效果，公开了一种采用多层结构夹持的压电超声雾化片，如图 1-10 所示。该雾化片由至少两组压电陶瓷环和网孔板组成，流体雾化时从下往上依次通过网孔板和压电陶瓷环。两个网孔板与一片压电陶瓷环的封闭区间组成了雾化片的内腔。下网孔板的锥孔角度大于上网孔板锥孔角度。流体经过下网孔板的锥孔挤压雾化形成大颗粒雾滴进入空腔中，之后再经过上网孔板的锥孔挤压剪切形成小颗粒雾滴进入外界环境中。雾化结构能够经过多次雾化以减小雾滴直径，并且能够有效控制雾化颗粒度。

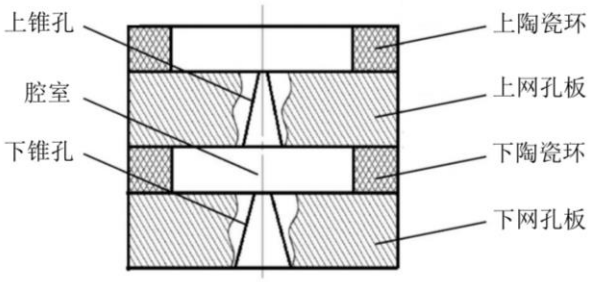


图 1-10 多层振动雾化片[28]

Fig. 1-10 Multi-layer vibrating atomizer sheet[28]

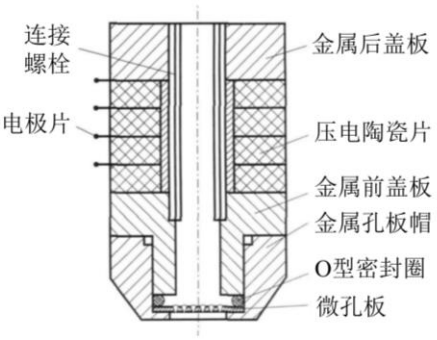


图 1-11 夹心式网孔雾化器[29]

Fig. 1-11 Sandwich mesh atomizer[29]

2012 年陈曦等人[29]为了减小压电陶瓷工作时发热温度对药液的影响，设计了一种夹心式振动网孔雾化器，如图 1-11 所示。金属盖板、压电陶瓷和连接螺栓轴向配合共同

中国知网 https://www.cnki.net

组成雾化器的换能部分，相邻压电陶瓷的极化方向相反。由于压电陶瓷没有直接与网孔板接触，而是将能量经过连接螺栓和金属前盖板放大后传递至网孔板。因此该雾化器具有较高的声电转化效率，并且能够降低压电陶瓷工作温度对药液的影响，非常适合低粘度药液的雾化，在生命体吸入式治疗领域有巨大的应用价值。

2019 年，Zhou 等人[30]为满足呼吸系统疾病治疗的需要，设计并制造了一种压电驱动的医用雾化装置，如图 1-12 所示。雾化片的上下两个面与密封圈相接，并且利用螺栓将雾化元件与壳体固定。通过实验研究得到，该雾化装置在驱动频率为 105 kHz 时，产生的雾化颗粒直径为 3 μm-4 μm，雾化速率为 0.07 g/min-0.08 g/min。该雾化器的雾化效果能够很好满足呼吸系统疾病治疗的需要。

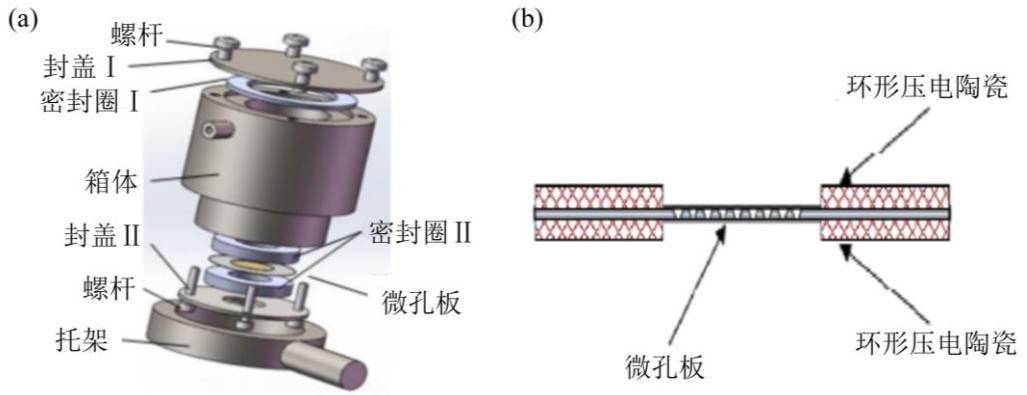


图 1-12 动态网孔医用雾化器[30]：（a）雾化器结构；（b）雾化片结构

Fig. 1-12 Dynamic mesh medical atomizer[30]: (a) Atomizer structure; (b) Structure of atomizer plate

综上，由于动态网孔雾化器的雾化机理是利用微孔板的振动将流体挤压碎裂而实现雾化。因此可以通过调节振动频率、振幅和固定角度等参数来雾化出不同粒径的雾滴，以满足不同的应用场所。特别是在吸入式医疗雾化领域中，动态网孔雾化器能够雾化出颗粒度均匀、颗粒直径小的气溶胶，使患者更好的通过肺部吸收药液。但是，由于锥孔直径较小，液体通过锥孔时会遭受较大的阻力，而网孔振动时难以提供足够的能量来克服这种阻力，因此动态网孔雾化器的雾化仍然受到流体粘度的限制。

1.3 高粘度流体超声雾化的研究现状

高粘度流体的雾化预示着一定需要高能量的供给，而单一振动维度的能量供给难以实现高能量聚集。常规的高粘度流体雾化大多采用加高热、加高压的方式来实现，这些方法很难保证流体不发生化学反应，也就是难以维持物理雾化来获得微小流体颗粒。压电超声雾化因其具有能量转换率和利用率高，雾化过程为物理过程，雾化粒径小等优点，

中国知网 https://www.cnki.net

在高粘度流体雾化领域逐渐成为研究热点。

2008 年，加拿大学者 Jun 等人[31]为了保证切削液在工件表面上均匀扩散以提高切削性能，开发了一种基于超声雾化的切削液应用系统，如图 1-13 所示。该切削液应用系统利用超声雾化器将高粘度切削液雾化成微小颗粒（直径约为 7 μm），之后经过高速流动的空气将切削液颗粒输送至工件表面。实验结果表明，切削液雾滴可以有效降低切削力和切削温度，提高刀具寿命，并且可以改善排屑效果。

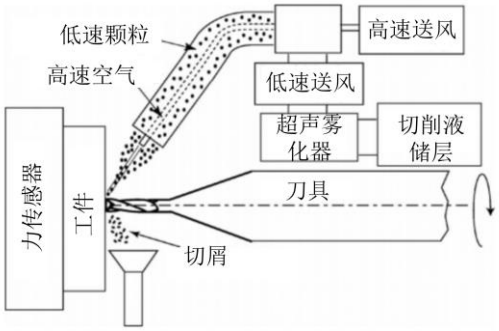


图 1-13 切削液超声雾化应用系统[31]

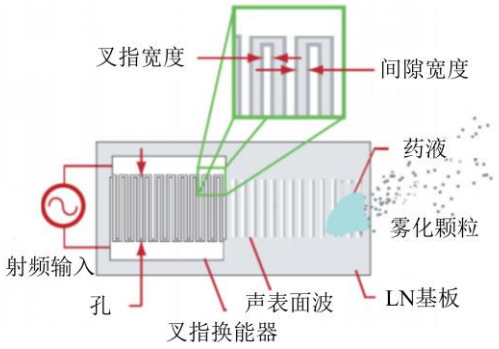


图 1-14 声表面波高粘度药液雾化平台[32]

Fig. 1-13 Ultrasonic atomization application system for cutting liquids[31]

Fig. 1-14 Surface acoustic wave high-viscosity medicine atomization platform[32]

2008 年，澳大利亚学者 Qi 等人[32]为了将粘度较高的药物以微粒形式直接输送到下呼吸道，设计了一种声表面波的高粘度药物雾化装置，如图 1-14 所示。该雾化平台在功率为 1.5 W 时成功将粘度较高的沙丁胺醇雾化，产生的气溶胶直径为 2.84±0.14 μm，并且利用双肺撞击模型证明，产生的气溶胶颗粒约 70%沉积在肺部内。该研究为经肺给药提供了高效的雾化平台，为后续高粘度流体超声雾化提供了重要的参考意义。

2013 年，瑞士学者 Raman 等人[33]为了在具有特殊功能材料的小型设备上实现低成本的喷墨打印，研究了直径为 80 μm 的微型压电打印头。并且在幅值电压为 98 V 时成功将动力粘度为 10.2 cP 的甘油溶液雾化，实现喷墨行为。

2022 年，日本学者 Yoshioka 等人[34]基于铌酸锂材料设计了一种小型雾化装置，该雾化装置主要由探头、铌酸锂装置和钢板组成，如图 1-15 所示。通过实验测试结果可以得到，当驱动频率为 7 MHz 时，实现动力粘度为 30 cP 甘油的雾化。并且雾化颗粒平均直径为 5.2 μm。实验结果还证明了铌酸锂材料制成的雾化器产生的雾化颗粒直径比压电陶瓷的小，但是驱动频率要大得多。同年，韩国首尔国立科技大学的 Lefebure[35]为了解决高粘性可生物降解油的雾化问题，设计了一种基于振动网孔的高粘度超声雾化器，如图 1-16 所示。通过纤维液体输送柱，将高粘性可生物降解油输送至振动网孔中实现雾

中国知网 https://www.cnki.net

化。在驱动电压为 150 Vpp，驱动频率为 115 kHz 时，实现运动粘度为 37 cSt（动力粘度约 30 cP）可生物降解油的有效雾化，这也是目前常温下超声雾化所能达到的最大粘度。

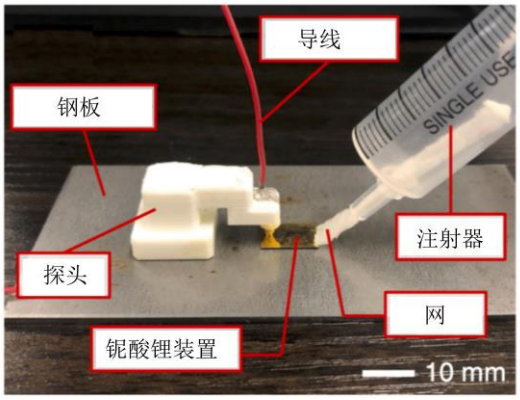


图 1-15 铌酸锂雾化装置[34]

Fig. 1-15 Lithium niobite atomizer[34]

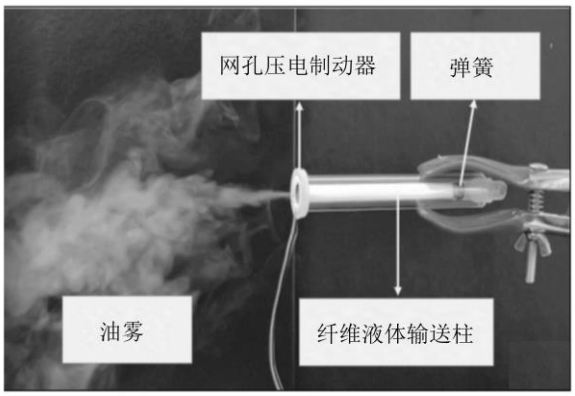


图 1-16 高粘性可生物降解油雾化器[35]

Fig. 1-16 High-viscosity biodegradable oil atomizer[35]

研究者们为了提高现有超声雾化器的雾化粘度，主要从提高单位能量密度的角度出发来实现高能量的供给。但是，声表面波雾化原理是将振动的能量施加到整个流体系统中，因此很难实现能量的集中。静态网孔雾化器工作时产生的压力波向前传递，使流体通过微细网孔而进行雾化，该过程通常需要耗费大部分本该作用于流体雾化的能量。而动态网孔雾化器的网孔直径较小，流体通过锥孔时会受到较大阻力，而网孔振动时难以提供足够的能量来克服这种阻力，因此该类型雾化器也难以实现能量的集中。高能量的供给是高粘度流体雾化的必要因素，而单一振动维度能量的供给很难实现高能量的供给。2023 年印度学者 Sharma 等人[36]从多维度能量供应的角度出发，在振动网孔雾化器的泵腔内添加了微加热元件，通过加热流体降低粘度进而降低雾化阈值，来实现高粘度流体的雾化。并且该雾化器在低加热（小于 100 ℃）下可以雾化动力粘度高达 111 cP 的流体。加热流体可以有效地降低雾化阈值而实现高粘度雾化，但是超过 40 ℃的加热容易使蛋白质分子性质改变而限制其更为广泛的应用。

1.4 高粘度流体超声雾化的应用

高粘度流体的雾化常用于治疗患者呼吸道疾病，如：慢阻肺[37]、哮喘[38]与肺炎[39]等，近年也有用于肺癌治疗和经鼻黏膜治疗癫痫的报道[40]。特别是随着基因工程与基因治疗日趋成熟，吸入式供药将成为除口服、肌肉注射和血管等传统供药之外的重要方式，而超声雾化器具也将会成为吸入式供药最重要的工具。高粘度流体超声雾化的应用主要集中在以下几个方面：

中国知网 https://www.cnki.net

（1）生物医学应用

2009 年意大利学者 Barba 等人[41]设计了一种超声波辅助工艺雾化海藻酸盐溶液制备生物聚合物的方法。装置如图 1-17 所示，高粘度海藻酸盐溶液经过超声雾化后形成微小雾滴喷洒到正在搅拌的硫酸铜溶液中，海藻酸盐雾滴与硫酸铜溶液碰撞后凝固形成垂坠状的聚合物凝胶颗粒，该超声雾化辅助制备凝胶的方法之后在制药和保健领域得到应用。

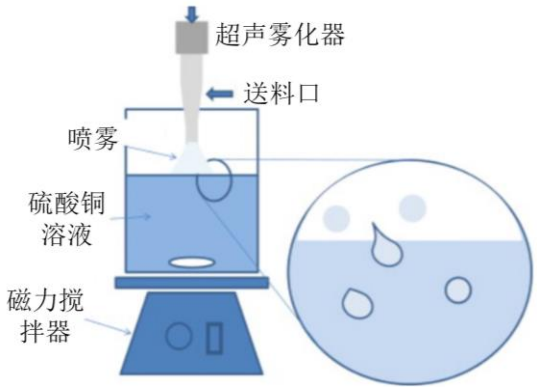


图 1-17 超声波辅助制备凝胶装置[41]

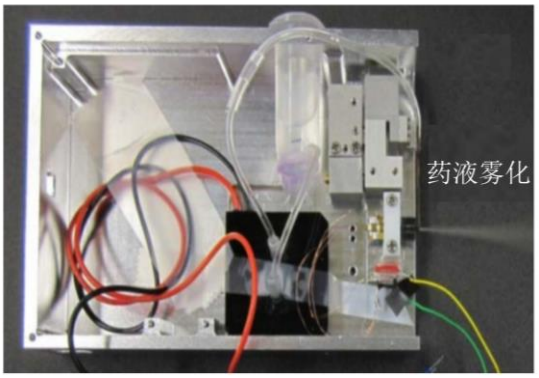


图 1-18 袖珍超声医用雾化器[42]

Fig. 1-17 Ultrasound-assisted gel preparation device[41]

Fig. 1-18 Pocket ultrasonic medical atomizer[42]

2013 年，美国学者 Tsai 等人[42]为了满足医用超声雾化器小型化的需求，设计了一种袖珍超声医用雾化器，如图 1-18 所示。该雾化器在驱动功率为 0.3 W 时能够实现高粘度沙丁胺醇和吸入用布地奈德混悬液的有效雾化，并且雾化速率为 200 μL/min，雾滴颗粒直径为 2.2 μm-4.6 μm。该研究为哮喘、慢性阻塞性肺疾病、糖尿病、肺纤维化和氰化物中毒等疾病的吸入式治疗提供了重要的工具。

2015 年，英国学者 Alton 等人[43]将携带非病毒基因的 DNA 与阳离子脂质体结合形成复合物，通过雾化给药的方式将高粘度复合物输入患者肺部，以达到治疗囊性纤维化的目的，通过实验验证了该吸入式基因治疗的安全性，为囊性纤维化的治疗提供了新的方法。

2020 年，厦门大学 Liu 等人[44]利用中药鱼腥草滴眼液雾化治疗睑板腺功能障碍等相关干眼症疾病。通过实验证明，经过超声雾化后的鱼腥草液滴能够均匀、连续、全面地作用于患者的眼结膜、眼睑和角膜，增大药液与患病部位接触面积，加快药液吸收，有效地改善睑板腺堵塞和睑板边缘状态。

（2）先进机械制造应用

2019 年，马来西亚学者 Hussin 等人[45]利用超声波雾化在硅片上沉积石墨烯衍生物

中国知网 https://www.cnki.net

制备电子器件，经过超声雾化后的氧化石墨烯能够均匀覆盖在硅片上，且覆盖面积大于 95%，不均匀性小于 20%，平均厚度约为 22 nm。

2020 年，台湾屏东科技大学 Huang 等人[46]将纳米流体（石墨烯）的超声雾化应用到高速钢切削中，设计一种超声雾化纳米流体辅助铣削系统，如图 1-19 所示。纳米流体油液经过超声雾化后以雾化颗粒的形式通过导管输送至喷嘴，之后用压缩空气将雾化后的颗粒喷射至切削区域实现润滑。通过实验证明，超声雾化降低了纳米颗粒在纳米流体中的团聚，降低切削温度，减少刀具磨损，提高纳米颗粒的润滑效率。

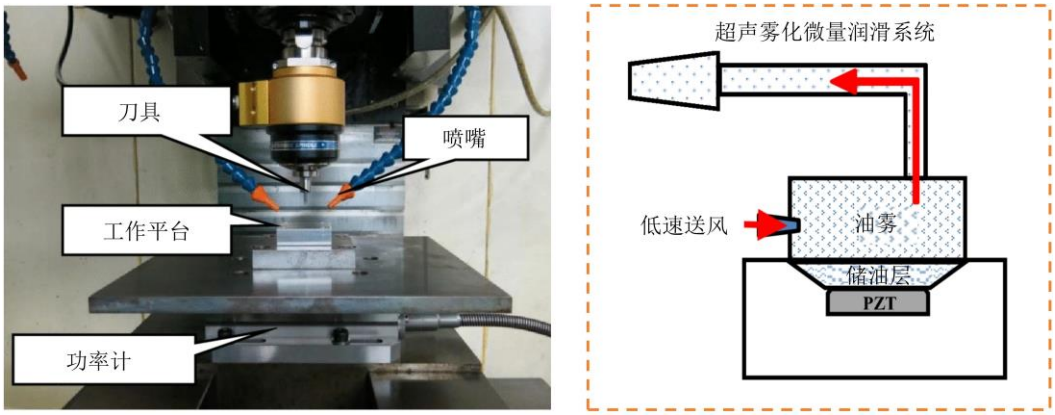


图 1-19 超声雾化纳米流体辅助铣削系统[46]

Fig. 1-19 Ultrasonic atomized nanofluid-assisted milling system[46]

（3）潜在应用

高粘度流体的超声雾化已经在生物医疗、智能制造和环境保护等领域得到应用，但是雾化流体的粘度很难超过 10 cP。随着应用范围扩大，高粘度流体的雾化技术追求也在日益增加。2015 年，意大利学者 Angelis 等人[47]提出一种利用 Recell 皮肤喷雾系统治疗慢性溃疡的技术。Recell 技术是将人体皮肤细胞经过分离、处理后制成 Recell 细胞悬液，之后利用装有喷嘴的注射器喷洒到病者患处促进皮肤愈合。提高超声雾化器的雾化粘度，可以有效地替代 Recell 细胞悬液的喷雾工具，提高雾化效率，改善治疗效果。因此高粘度流体的超声雾化应用于 Recell 皮肤喷雾技术是未来的发展方向。

1.5 超声雾化器的空化效应

在以往的研究中，研究者们普遍认为超声波雾化的机理有两种假说：空化假说和毛细波假说。毛细波假说是基于泰勒不稳定性[48]，其认为流体的毛细波由波峰和波谷组成，当流体受到超声振动时，流体表面的毛细波波峰会克服其表面张力，逃逸到空气中，形成雾滴。而空化假说通常适用于高频振动和高能量强度系统，当流体受到高频振动时，

中国知网 https://www.cnki.net

靠近表面的流体由于空化核（小气泡）的坍塌核爆炸，产生强大的冲击力，促使流体表面的液滴喷射到空气中，形成雾滴。

Lang 等人[49]通过拍摄流体振动时表面毛细波的波峰来测量振动导致的表面扰动，证明了超声雾化过程中毛细波起主要作用。之后 Kooij 等人[50]对不同喷雾器技术的液滴尺寸分布进行了系统研究，研究显示雾滴尺寸分布由毛细波波长决定，雾滴中位数大小与毛细波波长呈比例关系。而 Topp 等人[51]认为雾化可以发生在高振幅的毛细波的波峰，也可以发生在被共振气泡和瞬态气泡被剧烈运动破坏的流体的区域。Avvaru 等人[52]在研究流体粘度对雾化颗粒的影响时，提出了空化效应的存在以及对雾化的影响。2022 年，智利学者 Departamento[53]在超声雾化的过程中进行声空化检测，实验证明空化假说仅适用于喷泉型雾化，空化效应发生在振动幅度大于雾化阈值的区域。研究者们在这两种雾化机理中展开了各种论证，总结而言，多数研究认为毛细波是超声雾化的重要依据，空化效应是一种辅助作用或者伴随现象。

1.6 研究内容

高能量的聚集是高粘度流体雾化的必要因素，而单一振动维度能量的供给很难实现高能量的聚集。本团队基于二维振动实现高能量输入，首次提出了流管雾化。本文将重点剖析流管型雾化器的雾化机理以及验证其高粘度流体雾化的性能，同时探究空化效应在高粘度流体雾化过程中的作用，进一步解释空化效应与雾化性能的关系。本文将利用理论分析、仿真模拟和实验研究对流管型雾化器的高粘度流体雾化性能进行研究，并探究流管型雾化器在雾化过程中的空化现象。同时，本文还研究了空化参数对雾化性能的影响。

本论文的主要研究包括：

第一章：绪论。主要对超声雾化器进行综述，根据雾化机理的不同对超声雾化器进行分类，重点概述了声表面波雾化、静态网孔雾化和动态网孔雾化的国内外发展现状。概述高粘度流体超声雾化的发展现状及其应用，研究声表面波雾化器、静态网孔雾化器和动态网孔雾化器的优点和缺点，指出这三类超声雾化器高粘度流体雾化的局限。同时还概述超声雾化过程中的空化效应，基于此引出本文的研究目的、意义和内容。

第二章：流管型雾化器的结构与理论分析。从超声波振子的材料及选型、各组成部分的材料和连接模式设计流管型雾化器的整体结构和各组成部分。从空化效应的角度分析了流管型雾化器的工作原理，然后结合雾化流管的振动特性和牛顿第二定律推导出空

中国知网 https://www.cnki.net

化核在位移稳态响应下的受力。简化了空化阈值公式并与流体粘度建立联系。根据能量守恒定律，结合位移稳态响应下空化核受力推导出空化核瞬时崩溃压力。

第三章：超声空化有限元分析及雾化性能测试。基于理论分析的位移稳态响应下空化核受力，进行空化核溃灭仿真，分析空化核溃灭时释放的瞬时崩溃压力。搭建流管型雾化器性能测试实验平台，进行流管型雾化器常温下的阻抗分析实验和雾化速率实验，探究流管型雾化器高粘度流体雾化性能，证明理论分析和有限元仿真的正确性。

第四章：流管型雾化器的空化效应验证。根据超声空化效应使流体发生乳浊化，导致吸光度发生变化的原理，进行全光谱分析实验。分析对比雾化流管内雾化前和雾化后的光强变化，以此验证流管型雾化器在雾化过程中是否发生空化效应。进行雾化流管的空化雾化观测，观察流体与管壁接触区域的变化，进一步证明雾化过程中发生空化效应，验证理论分析的正确性。分析甘油混合物经过流管型雾化器雾化前后的拉曼光谱，探究流管型雾化器的雾化稳定性。

第五章：空化参数对雾化性能的影响。通过对流体进行加热和搅拌两种处理来影响空化阈值和空化核瞬时崩溃压力，进而分析上述处理对流管型雾化器雾化速率的影响，进一步分析空化强度与雾化速率的关系。证明提高空化强度能够有效地提高雾化粘度和雾化速率。分析加热和搅拌处理后流管型雾化器雾化颗粒和雾化前后拉曼光谱。

第六章：总结与展望。总结归纳了全文的研究工作，指出研究工作中存在的缺陷，同时对未来的工作进行了展望。

中国知网 https://www.cnki.net

第二章 流管型雾化器的结构与理论建立

流体内部绝大多数都会溶解有空气，这些空气以微米级别以下的气泡存在时被统称为空化核。超声空化效应是指在超声振动的作用下，存在于流体中的空化核发生振动，不断崩解和坍塌并释放巨大能量，对周围液体产生强烈的冲击和剪切的现象[54]。空化效应原理如图 2-1 所示。

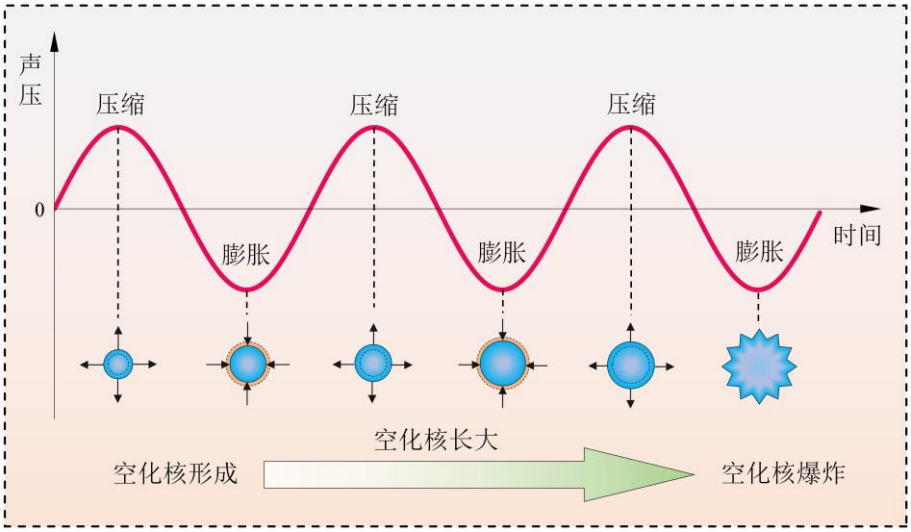


图 2-1 空化效应原理

Fig. 2-1 Principle of cavitation effect

流体发生空化效应的过程中，存在于流体中的空化核是产生空化效应的前提，声压的作用是流体发生空化的外部原因，声压幅值大小和作用时间长短是决定空化核状态的因素。空化核在超声波的作用下发生振荡，当流体受到正压作用时，存在于流体内的空化核向内部挤压收缩，当流体受到负压作用时，存在于流体内的空化核沿径向向外扩张膨胀。在交变载荷的作用下，空化核发生膨胀、收缩和振荡的一系列动力学过程，最后空化核溃灭瞬间释放巨大能量冲击流体而雾化，这也是本文的高粘度流体雾化的原理。

2.1 流管型雾化器的结构

本团队设计的流管型雾化器结构[55]如图 2-2（a）所示，雾化器结构由三个主体部分组成，从下往上依次为超声波振子、连接板和雾化流管. 超声波振子由压电陶瓷片和金属基底组成，并借助环氧树脂粘接贴合。压电陶瓷是由锆钛酸铅系列材料烧结而成的原片结构。图 2-2（b）和图 2-2（c）所示分别为流管型雾化器的正视图和侧视图，金属基底为旋转体结构，连接板为矩形结构，雾化流管为圆形通管结构。三个部分由 304 不锈

中国知网 https://www.cnki.net

钢单独机械加工而成。如图 2-2（d）所示，金属基底与连接板利用激光焊接而成，并且连接板置于金属基底的中心。如图 2-2（e）所示，雾化流管与连接板通过激光焊接连接。

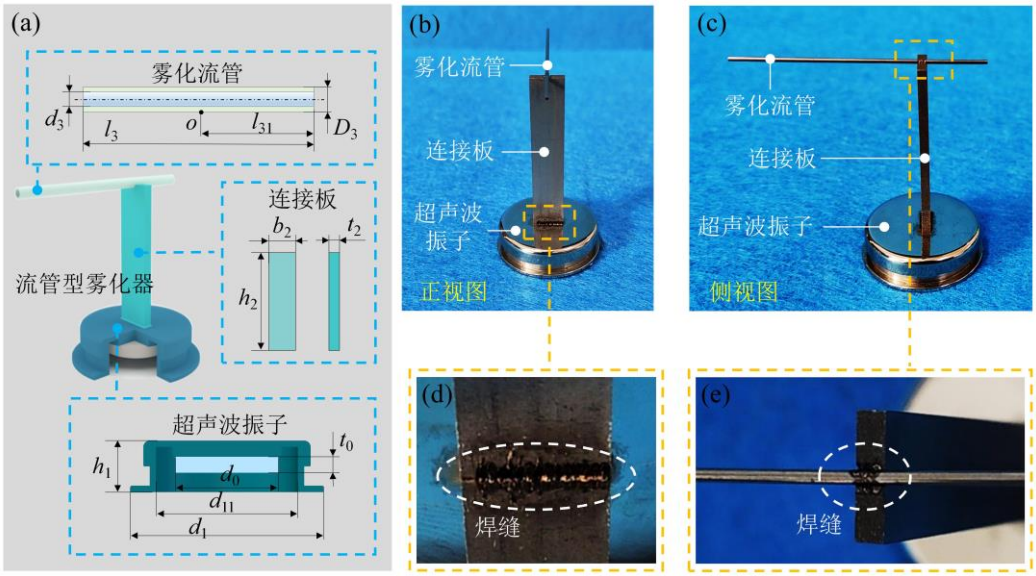


图 2-2 流管型雾化器：（a）结构示意图；（b）正视图；（c）侧视图；（d）连接板与金属底座的焊接区域；（e）雾化流管与连接板的焊接区域

Fig. 2-2 Flow tube atomizer: (a) Structural diagram; (b) Front view; (c) Side view; (d) Welding area of the connection plate to metal base; (e) Welding area of the atomizing flow tube to the connecting plate

表 2-1 流管型雾化器的结构参数

Table 2-1 Structural parameters of the flow tube atomizer

项目	尺寸(mm)
直径/d_0	Φ18.00
厚度/t_0	1.00
直径/d_1	Φ30.00
直径/d_{11}	Φ24.00
高度/h_1	8.00
宽度/b_2	9.00
高度/h_2	36.00
厚度/t_2	2.00
直径/D_3	Φ1.00
直径/d_3	Φ0.80
长度/l_3	45.00
长度/l_{31}	10.00

如图 2-2（a）所示为流管型雾化器的结构示意图。其中，压电陶瓷的结构参数主要包括：压电陶瓷直径 d_0、压电陶瓷厚度 t_0。金属基底的结构参数主要包括：金属基底外径 d_1、金属基底内径 d_{11}、金属基底高度 h_1。连接板的结构参数主要包括：连接板高度

中国知网 https://www.cnki.net

h_2、连接板宽度 b_2、连接板厚度 t_2。雾化流管的结构参数主要包括：雾化流管长度 l_3、雾化流管外径 D_3 与雾化流管内径 d_3，雾化出口至连接板长度为 l_{31}。尺寸参数如表 2-1 所示。

（1）超声波振子的介绍及压电陶瓷的选择

超声波振子作为流管型雾化器的动力源，其主要是由压电陶瓷与金属基底所构成，并且通过环氧树脂紧密粘接而成。压电陶瓷的物理性能参数决定了超声波振子的振动特性，进而决定流管型雾化器的雾化性能。目前，压电陶瓷的种类繁多，常见的压电陶瓷有：钛酸钡系列（BT）、锆钛酸铅系列（PZT）、铌酸盐系列（PMN-PT）、铝酸锂系列（LAS）和氧化锌系列（ZnO）等压电陶瓷。由于锆钛酸铅系列的压电陶瓷性能较稳定、能量转化效率高和弹性性能强等优点，因此本文选择了锆钛酸铅系列（PZT）的压电陶瓷。在锆钛酸铅系列（PZT）的压电陶瓷材料中，PZT-4 系列压电陶瓷具有更高的电-机械能转化效率和更广泛的工作范围，因此本研究选取纵向极化的 PZT-4 类型压电陶瓷。PZT-4 压电陶瓷的物理参数如表 2-2 所示。

表 2-2 PZT-4 压电陶瓷的物理参数

Table 2-2 Physical parameters of PZT-4 piezoelectric ceramics

参数	机电耦合系数	介电常数	弹性模量（10^3 N/m^2）	密度（10^3 kg/m^3）	机械品质因数	泊松比
数值	0.48	＜0.3	83	7.5	1000	0.3

（2）连接板

连接板为矩形结构，为了更好地限制矩形连接板沿宽度方向的振动，减少能量的耗散，连接板的宽度 b_2 为 9 mm，厚度 t_2 为 1 mm，宽厚比为 9。当连接板受到超声波振子纵向振动时，连接板可以沿着厚度方向和长度方向振动为雾化流管提供能量。

（3）雾化流管

由 304 不锈钢卷制的雾化流管作为流管型雾化器的雾化载体。其中，雾化流管的外径 D_3 为 Φ1 mm，内径 d_3 为 Φ0.8 mm。上述流管型雾化器的结构设计，一方面使雾化流管的横截面积较小但是未到达微米级别，可以有效地避免或者去除声表面波雾化机理和网孔雾化机理的影响。这是因为声表面波雾化是在平面基底上进行，网孔雾化的锥孔直径均在微米级别。另一方面，由于空化效应发生的条件较为苛刻，当雾化流管受到连接板的激励作用后，上述流管型雾化器的结构设计可以使雾化流管内流体在交替的压力振幅下发生剧烈的变化。空化效应极短时间内带来强大的瞬时冲击力，使高粘度流体雾化。

中国知网 https://www.cnki.net

2.2 流管型雾化器的理论推导

由于逆压电效应，超声波振子在交流电信号驱动下产生厚度方向振动，连接板将振动效果在连接点 O 处分解成纵向振动和弯曲振动作用于雾化流管。如图 2-3（a）所示，点 O_3 在纵向振动位移稳态响应下的受力为 f_{u_1}，在弯曲振动位移稳态响应下的受力为 f_{u_2}。

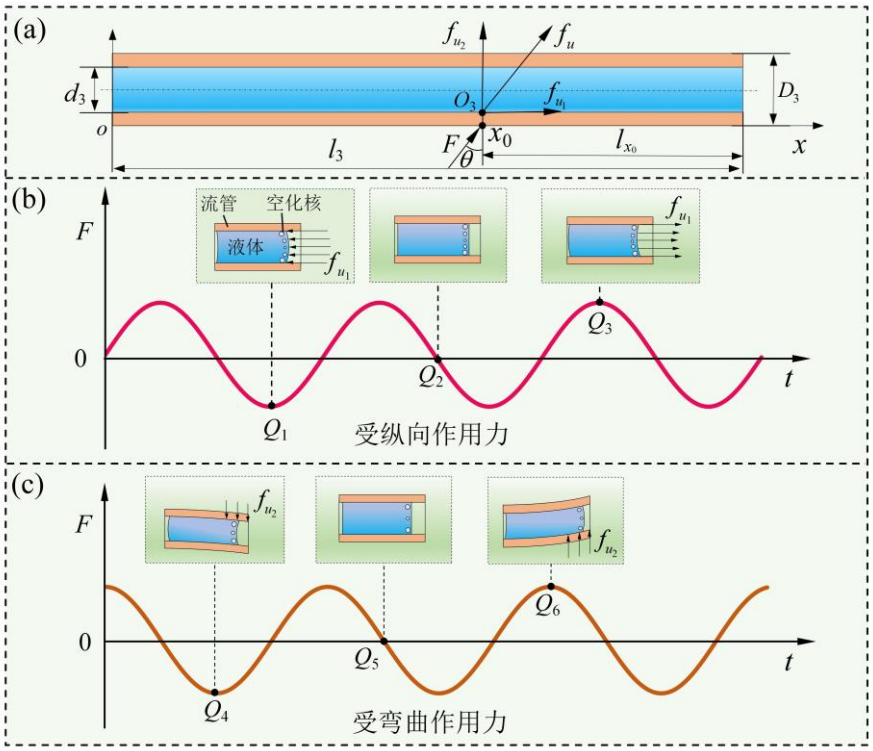


图 2-3 雾化流管受力分析：（a）雾化流管受力示意图；（b）雾化流管受纵向作用力；（c）雾化流管受弯曲作用力

Fig. 2-3 Force analysis of atomization flow tube: (a) Schematic force diagram of atomized flow tube; (b) Longitudinal force on atomized flow tube; (c) Bending force on atomized flow tube

如图 2-3（b）所示，雾化流管内液体受到纵向的交变作用力作用时，同时由于雾化流管内壁与流体之间摩擦力的存在，雾化流管内流体沿着轴线方向被压缩和拉伸。即流体受到强大的纵向拉力作用而产生负压，溶解在流体内的空化核增大。随后交替的拉压力使空化核在极短的时间内吸收能量不断膨胀、收缩，最终爆裂崩溃产生强大的瞬时冲击力作用于流体而雾化。同理，如图 2-3（c）所示，雾化流管内流体受到弯曲交变作用力作用时，雾化流管内流体沿着竖直方向不断地被压缩和拉伸。即雾化流管相对于水平状态向上和向下弯曲使得管内液体受到强大的竖直拉力作用而产生负压，溶解在液体内

中国知网 https://www.cnki.net

的空化核增大，在超声振动的作用下而发生空化效应作用于流体而雾化。

2.2.1 雾化流管理论建立

如图 2-3 所示，雾化流管在受到激振力 F 作用时产生周期性振动，定义雾化流管纵向振动位移稳态响应和弯曲振动位移稳态响应分别为[55]：

$$u_1=\frac{F\cos\theta e^{i(\omega_0 t-\varphi_{n_1})}W_{n_1}(x_0)W_{n_1}(x)}{\left[K_{n_1}\sqrt{\left(1-\bar{\omega}_{n_1}^2\right)^2+\left(2\xi_{n_1}\bar{\omega}_{n_1}\right)^2}\right]} \tag{2-1}$$

$$u_2=\frac{F\sin\theta e^{i(\omega_0 t-\varphi_{n_2})}W_{n_2}\left(x_0\right)W_{n_2}\left(x\right)}{\left[\bar{\omega}_{n_2}^2\sqrt{\left(1-\bar{\omega}_{n_2}^2\right)^2+\left(2\xi_{n_2}\bar{\omega}_{n_2}\right)^2}\right]} \tag{2-2}$$

式中，u_1 为雾化流管的纵向振动位移稳态响应，u_2 为雾化流管的弯曲振动位移稳态响应，F 为激振力幅值，θ 为激振力倾斜角度，φ_{n_1} 为纵向振动的相位，φ_{n_2} 为弯曲振动的相位，$W_{n_1}(x)$ 为雾化流管在 x 点处的纵向振动振型，$W_{n_2}(x)$ 为雾化流管在 x 点处的弯曲振动振型，x_0 为激振力作用点，ω_0 为激振频率，ω_{n_1} 为纵向振动固有频率，ω_{n_2} 为弯曲振动固有频率，$\bar{\omega}_{n_1}$ 为激振频率和纵向振动固有频率之比，$\bar{\omega}_{n_2}$ 为激振频率与弯曲振动固有频率之比，K_{n_1} 为纵向振动的模态刚度，ξ_{n_1} 为纵向振动的相对阻尼系数，ξ_{n_2} 为弯曲振动的相对阻尼系数。

根据式（2-1）与式（2-2）的位移稳态响应，分别对时间求两次偏导，分别得到雾化流管内壁单个质点的纵向振动位移稳态响应的加速度和弯曲振动位移稳态响应的加速度。假设雾化流管内壁某点质量为 m，则该点在振动位移稳态响应下的加速度分别可以表示为：

$$a_1=\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}=-\omega_0^2\frac{F\cos\theta e^{i(\omega_0 t-\varphi_{n_1})}W_{n_1}\left(x_0\right)W_{n_1}\left(x\right)}{\left[K_{n_1}\sqrt{\left(1-\bar{\omega}_{n_1}^2\right)^2+\left(2\xi_{n_1}\bar{\omega}_{n_1}\right)^2}\right]} \tag{2-3}$$

$$a_2=\frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2}=-\omega_0^2\frac{F\cos\theta e^{i(\omega_0 t-\varphi_{n_2})}W_{n_2}(x_0)W_{n_2}(x)}{\left[\bar{\omega}_{n_2}^2\sqrt{(1-\bar{\omega}_{n_2}^2)^2+\left(2\xi_{n_2}\bar{\omega}_{n_2}\right)^2}\right]} \tag{2-4}$$

式中，a_1 为雾化流管内壁质点纵向振动位移稳态响应的加速度，a_2 为雾化流管内壁质点弯曲振动位移稳态响应的加速度。

中国知网 https://www.cnki.net

根据牛顿第二定律，可以得到雾化流管内壁单个质点，在振动位移稳态响应下的纵向受力和弯曲受力，如式（2-5）和式（2-6）所示：

$$f_{u_1}=-\omega_0^2 m\frac{F\cos\theta e^{i(\omega_0 t-\varphi_{n_1})}W_{n_1}(x_0)W_{n_1}(x)}{\left[K_{n_1}\sqrt{(1-\bar{\omega}_{n_1}^2)^2+\left(2\xi_{n_1}\bar{\omega}_{n_1}\right)^2}\right]} \tag{2-5}$$

$$f_{u_2}=-\omega_0^2 m\frac{F\sin\theta e^{i(\omega_0 t-\varphi_{n_2})}W_{n_2}\left(x_0\right)W_{n_2}(x)}{\left[\bar{\omega}_{n_2}^2\sqrt{\left(1-\bar{\omega}_{n_2}^2\right)^2+\left(2\xi_{n_2}\bar{\omega}_{n_2}\right)^2}\right]} \tag{2-6}$$

式中，f_{u_1} 为雾化流管内壁质点纵向受力，f_{u_2} 为雾化流管内壁质点弯曲受力，m 为雾化流管内壁的质点质量。当激振点位置确定时，即 $l_{x_0}=l_{31}$ 时，雾化流管内壁质点纵向受力和弯曲受力可以简化为：

$$f_{u_1}=-\omega_0^2 m A_{n_1}e^{i(\omega_0 t-\varphi_{n_1})} \tag{2-7}$$

$$f_{u_2}=-\omega_0^2 m A_{n_2}e^{i(\omega_0 t-\varphi_{n_2})} \tag{2-8}$$

其中，A_{n_1} 为激振点在 x_0 处的纵向振动幅值，A_{n_2} 为激振点在 x_0 弯曲振动幅值。

2.2.2 流管型雾化器的空化理论推导

空化效应是本研究流管型雾化器能够实现雾化的原因，对其分析能够进一步探究流管型雾化器的雾化机理。当雾化流管受力振动时，同时由于雾化流管内壁与流体之间摩擦力的存在，雾化流管内流体不断地被压缩和拉伸，即流体受到强大的拉力作用而产生负压，溶解在流体内的空化核体积逐渐增大。流体受到的压力作用时，空化核体积缩小。因此将雾化流管内壁单个质点的纵向受力和弯曲受力近似为空化核的纵向受力和弯曲受力：

$$P_{u_1}=f_{u_1}=-\omega_0^2 m A_{n_1}e^{i(\omega_0 t-\varphi_{n_1})} \tag{2-9}$$

$$P_{u_2}=f_{u_2}=-\omega_0^2 m A_{n_2}e^{i(\omega_0 t-\varphi_{n_2})} \tag{2-10}$$

其中，P_{u_1} 为空化核纵向受力，P_{u_2} 为空化核弯曲受力。对空化核受力进行矢量计算可以得到空化核在稳态响应下受到的外力为：

$$P_u=P_{u_1}\cos\left(\arctan\frac{P_{u_2}}{P_{u_1}}\right)=P_{u_1}^2\frac{1}{\sqrt{P_{u_1}^2+P_{u_2}^2}} \tag{2-11}$$

中国知网 https://www.cnki.net

结合式（2-9）、式（2-10）和式（2-11）可以得到：

$$P_u = \frac{\omega_0^3 m A_{n_1}^2 e^{2i(\omega_0 t-\varphi_{n_1})}}{\sqrt{A_{n_1}^2 e^{2i(\omega_0 t-\varphi_{n_1})} + A_{n_2}^2 e^{2i(\omega_0 t-\varphi_{n_2})}}} \tag{2-12}$$

空化理论认为，在任何未经处理的流体中，均存在着空化核（微小气泡），由于空化核的存在，当流体内的空化核在受到相应的作用力后，发生有核空化。当流体中存在有半径为R_0的空化核时，有核空化的空化阈值可以表示为[56]：

$$P_{\mathrm{B}} = P_0 - P_{\mathrm{V}} + \frac{2}{3\sqrt{3}}\sqrt{\frac{\left(\frac{2\sigma}{R_0}\right)^3}{\left(P_0 - P_{\mathrm{V}} + \frac{2\sigma}{R_0}\right)}} \tag{2-13}$$

其中，P_{B}为有核空化的空化阈值，P_0为环境压力，P_{V}为气体内饱和蒸汽压，σ为表面张力系数，R_0为无扰动空化核半径。

流体粘度是一种物理属性，用于表征流体受到剪切力时内部分子之间相互作用力的强度和阻力。同时也可以被视为流体内部分子黏附和相互滑动的难易程度。粘度越高的流体，其内部分子间的相互作用力就越大。因此，在流体内部的空化效应中，流体粘度越大，流体发生空化效应所需要的阈值就越高，在目前的研究中，通常利用经验公式来表征流体粘度与空化阈值的关系[56]：

$$P_{\mathrm{B}} = 0.8\left(\lg\eta + 5\right) \tag{2-14}$$

式中，η为流体粘度。

超声波振动的作用下，雾化流管内流体空化核受到的外力为P_u，当空化核受到的外力P_u大于空化阈值P_{B}时，空化核将在极短的时间内吸收能量不断膨胀、收缩、最终爆裂崩溃塌缩，而空化核坍缩时产生的冲击压力是高粘度流体雾化的决定因素。根据瞬态空化理论，空化核崩溃过程中，空化核在外力作用下开始收缩，空化核半径由初始值R_m开始缩小，并且受到膨胀压力的阻碍，空化核膨胀压力可以表示为[57]：

$$P_{\mathrm{s}} = P_{\mathrm{V}} + P_{\mathrm{g}}\left(\frac{R_{\mathrm{m}}}{R}\right)^3 \tag{2-15}$$

式中，P_{s}是空化核半径为R时的膨胀压力，P_{g}是空化核内气体分压，R_{m}为空化核崩溃时初始半径。

忽略空化核表面张力的影响，空化核在外力 P_u 的作用下，收缩压力克服膨胀压力

中国知网 https://www.cnki.net

做功可以表示为：

$$W_{\mathrm{c}}=-\int_{R}^{R_{\mathrm{m}}}\left(P_u-P_s\right)4\pi R^2\mathrm{d}R \tag{2-16}$$

其中，W_{c} 为空化核收缩压力克服膨胀压力做功，P_u 为空化核在位移稳态响应下所受外力，$4\pi R^2\mathrm{d}R$ 为空化核收缩体积。

空化核崩溃过程中，空化核的体积开始缩小，因此，空化核的体积变化所获得的动能可以表示为：

$$E_k=\frac{mV^2}{2}=\frac{1}{2}\rho\int_{R}^{\infty}4\pi r^2\mathrm{d}r\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)^2 \tag{2-17}$$

其中，ρ 为流体密度，$4\pi r^2\mathrm{d}r$ 为流体变化的体积，$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$ 为流体移动的速度，假设流体不可压缩，那么空化核收缩的体积等于流体变化的体积，因此，可以得到如下关系：

$$R^2\mathrm{d}R=r^2\mathrm{d}r \tag{2-18}$$

根据式（2-18），两边同时除 $\mathrm{d}t$，可以得到以下关系：

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=\left(\frac{R}{r}\right)^2r^2\mathrm{d}r \tag{2-19}$$

结合式（2-19）和式（2-17）可以得到空化核的体积变化所获得的动能：

$$E_{\mathrm{k}}=2\pi\rho R^2\left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}\right)^2 \tag{2-20}$$

根据能量守恒定理，空化核收缩压力克服膨胀压力做功等于空化核的体积变化所获得的动能，其可以表示为：

$$-4\pi\int_{R}^{R_{\mathrm{m}}}\left(P_u-P_{\mathrm{s}}\right)R\mathrm{d}R=2\pi\rho R^3\left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}\right)^2 \tag{2-21}$$

根据式（2-15）和式（2-21），空化核壁面的运动方程可以表示为：

$$R\left(\frac{\mathrm{d}^2R}{\mathrm{d}t^2}\right)+\frac{3}{2}\left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}\right)^2=\frac{1}{\rho}\left[P_{\mathrm{V}}+P_{\mathrm{g}}\left(\frac{R_{\mathrm{m}}}{R}\right)^3-P_u\right] \tag{2-22}$$

忽略空化核内蒸汽压，并把空化核崩溃作为绝热过程，式（2-22）可以表示为：

$$R\left(\frac{\mathrm{d}^2R}{\mathrm{d}t^2}\right)+\frac{3}{2}\left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}\right)^2=\frac{1}{\rho}\left[P_{\mathrm{g}}\left(\frac{R_{\mathrm{m}}}{R}\right)^{3\gamma}-P_u\right] \tag{2-23}$$

式中 γ 为气体的比热容比。

由于流体受到超声振动的作用，空化核的半径随着压力幅值的变化而变化，当压力

中国知网 https://www.cnki.net

幅值为正值时，空化核受压收缩。空化核半径被压缩到最小值 $R_{\min}$，当压力幅值为负值时，空化核受拉膨胀。空化核半径膨胀到 R_{m}，当空化核壁面运动到 $R_{\min}$ 和 R_{m} 两个极点处时，速度变为 0，即 $\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}=0$。同时定义 $\left(\frac{R_{\mathrm{m}}}{R}\right)^3=Z$，因此，根据式（2-23）可以得到：

$$P_u\left(Z-1\right)\left(\gamma-1\right)=P_{\mathrm{g}}\left(Z^{\gamma}-Z\right) \tag{2-24}$$

当 R 值趋近无穷小，Z 值趋近无穷大时，并将（Z−1）近似为 Z，式（2-24）表示为：

$$Z=\left[\frac{P_u\left(\gamma-1\right)}{P_{\mathrm{g}}}\right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \tag{2-25}$$

空化核崩溃过程中，空化核体积由初始值开始缩小，当体积被压缩到最小值时，空化核内的压力达到崩溃值，空化核体积与压力的关系可以表示为：

$$P_{\max}V_{\min}^{\gamma}=P_{\mathrm{g}}V_{\max}^{\gamma} \tag{2-26}$$

式中，$P_{\max}$ 为空化核瞬时崩溃压力，$V_{\min}$ 为空化核体积最小值，$V_{\max}$ 为空化核体积最大值。根据气泡体积与气泡半径的关系式 $V=\frac{4}{3}\pi R^3$，可以得到：

$$\frac{V_{\max}}{V_{\min}}=\left(\frac{R_{\mathrm{m}}}{R_{\min}}\right)^3=Z \tag{2-27}$$

根据式（2-26）和式（2-27）可以得到下列关系：

$$\left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}}\right)^{\gamma}=\frac{P_{\max}}{P_{\mathrm{g}}}=Z^{\gamma} \tag{2-28}$$

根据式（2-25）与（2-28）可以得到空化核瞬时崩溃压力为：

$$P_{\max}=P_{\mathrm{g}}Z^{\gamma}=P_{\mathrm{g}}\left[\frac{P_u(\gamma-1)}{P_{\mathrm{g}}}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{2-29}$$

由式（2-29）可知，空化核在稳态响应下受到的外力 P_u 是决定空化核瞬时崩溃压力 $P_{\max}$ 的关键，空化核所受外力越大，空化核崩溃时的压力就越大。为了得到空化核瞬时崩溃压力与激振频率和振动幅值的关系，将式（2-12）代入式（2-29）可以得到：

$$P_{\max}=P_{\mathrm{g}}\left[\frac{\left(\gamma-1\right)\omega_0^3mA_{n_1}^2e^{2i(\omega_0t-\varphi_{n_1})}}{P_{\mathrm{g}}\sqrt{A_{n_1}^2e^{2i(\omega_0t-\varphi_{n_1})}+A_{n_2}^2e^{2i(\omega_0t-\varphi_{n_2})}}}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{2-30}$$

雾化流管受到激振力 F 的作用时产生周期性振动，空化核在稳态响应下受力 P_u 大于空化阈值 P_{B} 时，流体发生空化效应。空化核瞬时吸收能量，并随压力幅值变化而不

中国知网 https://www.cnki.net

断收缩、膨胀，空化核体积收缩到最小值时发生崩溃，而崩溃瞬间产生强大的瞬时崩溃压力作用于流体而实现雾化。空化核瞬时崩溃压力是本研究高粘度流体雾化的直接原因。

2.3 本章小结

首先从超声空化原理出发，研究了由三大主体部分构成的流管型雾化器，分析了该流管型雾化器选用的超声波振子和各组成部分的材料以及各组成部分间连接模式。基于上述流管型雾化器，从理论上完成了雾化流管的受力分析以及空化理论推导：

（1）引用位移稳态响应公式，结合雾化流管的振动特性和牛顿第二定律，推导出雾化流管内壁质点振动位移稳态响应下受到的横向作用力和纵向作用力，并且将流管内壁质点受力与振动幅值建立联系。

（2）推导了空化核在位移稳态响应下的受力，简化了空化阈值公式并与流体粘度建立关系。当空化核所受外力大于空化阈值时，流体发生空化效应，流体粘度越高，流体发生空化所需要的阈值就越大，作用于空化核所需的外力就越大。

（3）根据能量守恒定律，空化核崩溃过程中外力克服膨胀压力做功等于体积变化所获得的动能，结合位移稳态响应下空化核的受力推导出空化核瞬时崩溃压力。空化核崩溃瞬间将瞬时崩溃压力释放到流体中，在强大的瞬时冲击力的作用下流体被打散形成微小颗粒而实现雾化。

中国知网 https://www.cnki.net

第三章 超声空化有限元分析与雾化性能测试

上一章介绍了流管型雾化器的结构，进行了流管型雾化器的雾化机理分析和空化理论分析。为了证明流管型雾化器在外力作用下发生空化效应，对雾化流管内空化核溃灭进行仿真分析，并且对流管型雾化器的高粘度雾化性能进行测试。

3.1 超声空化有限元分析

有限元分析可以模拟流管型雾化器内空化核在外力作用下的溃灭情况，对于流管型雾化器的雾化机理研究具有重大意义。为了研究流管型雾化器内空化核的溃灭过程，证明空化核在外力作用塌缩产生强大瞬时崩溃压力作用于高粘度流体而雾化。将雾化流管内空化核溃灭过程近似为固壁面附近空化核溃灭过程[58,59]，并且利用 Fluent 模拟空化核在外力 P_u 作用下的运动情况。其中流管型雾化器的交流信号驱动频率设置为 507 kHz，并且根据流管型雾化器的多普勒振动位移测试可以得到雾化流管纵向振动幅值最大值为 A_{n_1}=0.117 μm，弯曲振动幅值最大值为 A_{n_2}=0.270196 μm[55]。结合式（2-12）可以得到空化核所受外力 P_u。由于空化核尺寸较小，因此将雾化流管简化成 20 mm×10 mm 的矩形区域，空化核直径 R 设置为 2 mm，空化核位于壁面距离 L 为 2 mm，并且利用 SpaceClaim 建立如图 3-1 所示的计算模型。

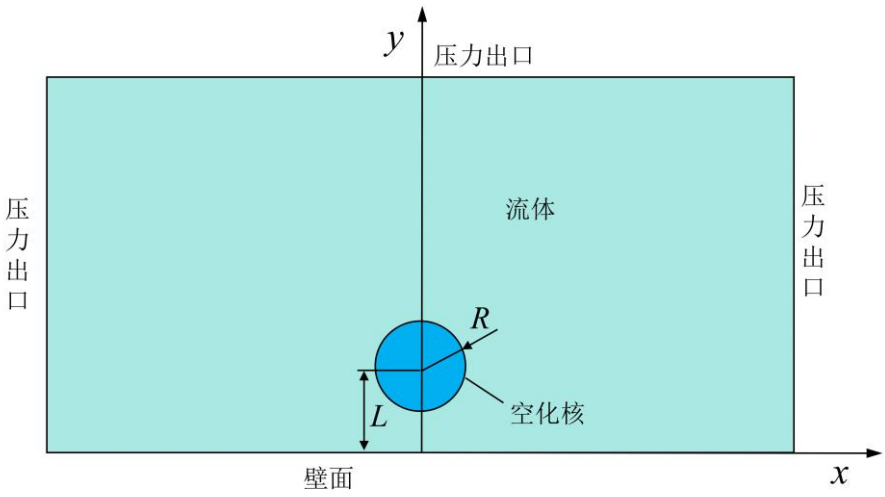


图 3-1 计算模型

Fig. 3-1 Calculation model

选择四边形主导网格对计算模型进行网格划分，最终得到 381938 个网格单元。同时，为了得到更为准确的模拟结果，对空化核附近的区域网格进行加密处理。设置计算

中国知网 https://www.cnki.net

模型的左边界、右边界和上边界为压力出口，设置下边界为壁面。假设液相不可压缩，同时考虑流体的粘性和空化核的表面张力，并且将流体动力粘度设置为 100 cP。设置流体的流动形态为层流，选择气液两相流体进行计算，并且采用 VOF 方法进行求解，设置空化核内部气体为理想气体。空化核内初始压力设置为 2340 Pa，空化核周围环境压力 P_u 设置为 0.1 MPa，最后开始计算。

空化核溃灭压力云图如图 3-2 所示，有限元仿真结果显示，空化核在外力 P_u 的作用下体积由初始值开始缩小，当 t=180 μs 时，空化核在内外压差的作用下体积达到最小值，空化核开始溃灭，并且向周围流体释放压力为 0.116 MPa。随着时间的增加，空化核向流体释放的压力逐渐增大。并且在 t=200 μs 时达到最大值，瞬时崩溃压力为 7.31 MPa，流体所受力最大值与初始值压力差近 73.1 倍。因此，动力粘度为 100 cP 的高粘度甘油混合物能够在强大的瞬时崩溃压力作用下实现雾化。仿真与理论结合，解释了流管型雾化器高粘度流体雾化的工作原理。

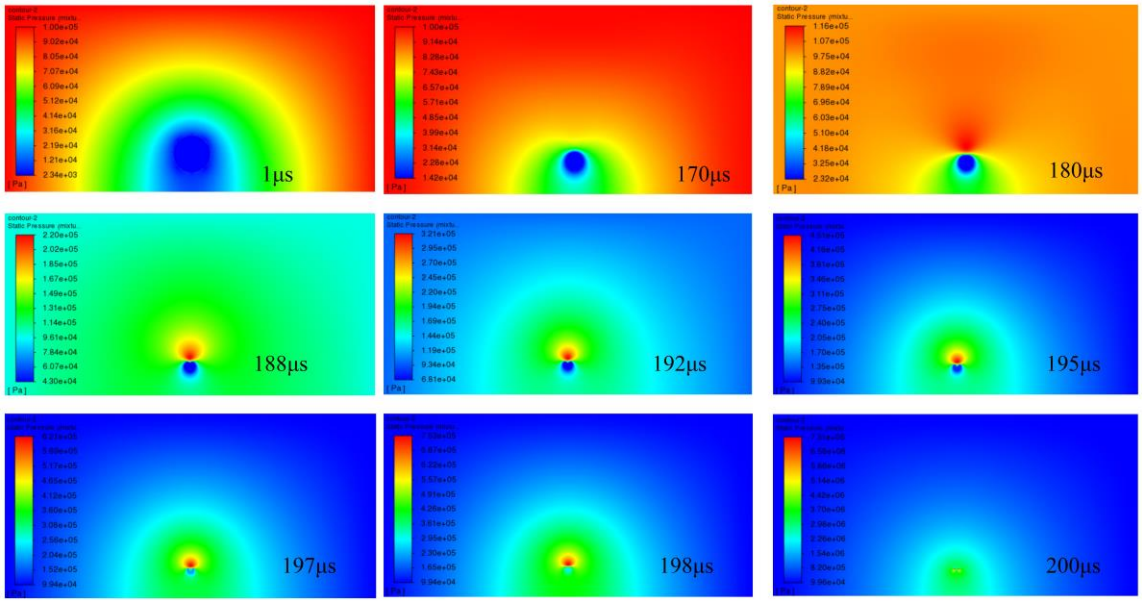


图 3-2 空化核溃灭压力云图

Fig. 3-2 Pressure cloud of cavitation nucleus collapse

3.2 流管型雾化器的雾化性能测试

实验是科学研究中重要的组成成分，贯穿着整个研究的脉络，对理论研究具有指导性及验证性作用。对流管型雾化器进行高粘度流体雾化实验研究，探究流管型雾化器在不同实验条件下的雾化性能。

中国知网 https://www.cnki.net

3.2.1 流管型雾化器实验平台搭建

本文所有实验研究均在室内无风、常温和恒湿的环境下进行，实验仪器和材料的型号如下：

1、信号发生器（AFG，美国 Tekronix 公司）：输出正弦的交流信号，调节流管型雾化器的驱动电压和频率。

2、功率放大器（HSA4051，日本 Negative Feedback 公司）：将从信号发生器输出正弦的交流信号放大，控制流管型雾化器在预设的电压值下工作。

3、数字示波器（DSO-X2004A，美国 Keysight 公司）：对流管型雾化器的工作电压实时监测。

4、直流电源（GPC3060D，苏州固纬电子有限公司）：为蠕动泵的驱动提供直流电，保障流体供应。

5、高功率可见红外线光源（ATG1100，厦门奥谱天成光电有限公司）：测量雾化流管内空化现象。

6、自对焦显微拉曼成像光谱仪（ATR8300，厦门奥谱天成光电有限公司）：测试流管型雾化器雾化前后拉曼光谱图。

7、显微共焦拉曼光谱仪（LabRAM HR Evolution，法国 Horiba 公司）：测试在不同温度和搅拌速率下流管型雾化器雾化前后拉曼光谱图。

8、超景深 3D 显微镜系统（VHX-5000，日本 Keyence 公司）：观测经过搅拌后的流体内部空化核。

9、激光粒度分析仪（Winner311XP，济南微纳颗粒仪器股份有限公司）：测量雾化颗粒直径。

10、电子分析天平（FA2204，上海力辰仪器科技有限公司）：测量流管雾化器的雾化量，精度 0.0001 g。

11、电热数显恒温水浴锅（BHS-1，浙江群安科学仪器有限公司）：加热和保温雾化流体。

12、磁力搅拌器（85-2，日本三丰公司）：通过搅拌雾化流体，增加雾化流体中的气泡含量。

13、旋转式粘度计（NDJ-1，上海力辰仪器科技有限公司）：测试流体经过加热处理后的粘度。

中国知网 https://www.cnki.net

14、蠕动泵：输送实验流体。

15、实验流体：煤油、脂肪酸甲酯和甘油混合物（由丙三醇和丙二醇根据不同比例混合），粘度 0 cP-200 cP。

16、硅胶瓶：收集和储存实验流体。

17、硅胶导管：连通雾化器、蠕动泵和硅胶瓶。

18、精密光学平台：提供稳定、平整的实验工作台面。

19、升降平台：调整流管型雾化器的高度。

20、摄像机：记录流管型雾化器的雾化状态。

21、计算机：处理实验数据。

22、秒表：记录流管型雾化器的雾化时间。

需要注意的是，实验所使用的甘油混合物是由丙二醇和丙三醇（甘油）根据不同比例混合而成[55]。选择丙二醇和丙三醇两种溶液配比不同粘度的流体，这是因为这两种化合物能够与水、乙醇及多种有机溶剂混溶。并且这两种流体的沸腾温度相差较大，其中丙二醇的沸腾温度为 187 ℃，丙三醇的沸腾温度为 290 ℃。而本研究的所有实验温度均在 50 ℃以下进行，该温度不会导致两种流体的沸腾，因此丙二醇和丙三醇的混合溶液不会对研究中的实验造成影响。

3.2.2 流管型雾化器阻抗测试

阻抗分析是测试物体谐振频率最直接的方式之一，对物体进行阻抗分析实验可以缩短科学研究周期，提高科学研究的效率。阻抗分析仪是一种用于测量和分析电路中阻抗特性的仪器，其原理是基于交流电路中电压和电流之间的关系，通过测量电路中的电压和电流，能够计算出电路的阻抗参数。不同种类的流体通入到流管型雾化器中，由于粘度的不同，流体层与层之间的摩擦力将会发生变化，导致流体流动性发生变化。流体的流动性是否会影响流管型雾化器的刚度，进而影响流管型雾化器的谐振频率，这将是本文阻抗分析实验的主要目的。

为了确定流管型雾化器的最佳工作频率，需要对流管型雾化器进行阻抗分析，分析常温环境下流管型雾化器在通入不同粘度流体后的谐振频率。流管型雾化器的阻抗分析测试装置如图 3-3 所示。待测流体分别为煤油（动力粘度为 2.2 cP）、脂肪酸甲酯（动力粘度为 5.5 cP）以及动力粘度分别为 50 cP、75 cP、100 cP、125 cP、150 cP 和 175 cP 的

中国知网 https://www.cnki.net

甘油混合物。首先利用直流电源驱动蠕动泵，将待测流体分别泵送至流管型雾化器的流管中。其次将阻抗分析仪的扫描频率设置为 300-550 kHz，扫描电压设置为 2 V，最后对充满待测流体的流管型雾化器进行扫频分析并记录实验数据。

应当注意的是每次测量完一组待测流体的阻抗之后，需要利用蠕动泵输送空气将硅胶导管以及雾化流管内的流体完全排出，才可以进行下一组实验，以此确保阻抗分析实验结果的准确性。

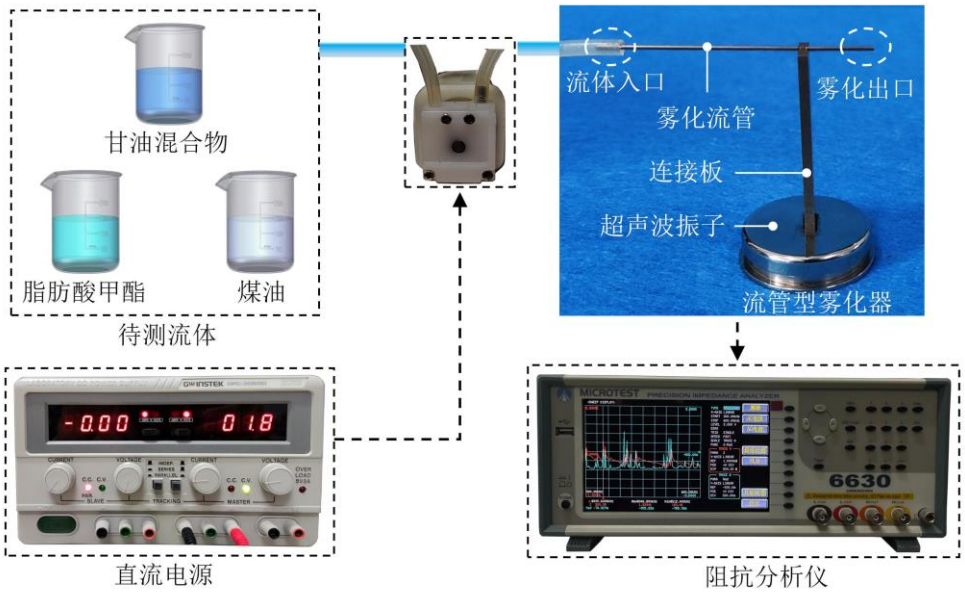


图 3-3 流管型雾化器阻抗分析实验装置

Fig. 3-3 Experimental setup for impedance analysis of flow tube atomizer

流管型雾化器压电陶瓷的性能决定了流管型雾化器的谐振频率，同时，谐振频率也会受到质量和刚度的影响。如图 3-4 所示为流管型雾化器在通入煤油、脂肪酸甲酯以及不同粘度的甘油混合物后的阻抗分析结果，图中曲线的极大值点代表流管型雾化器的反谐振频率，而极小值点代表雾化器的谐振频率。

阻抗分析实验以流管型雾化器空载时测得的阻抗作为对照组，如图 3-4（a）所示，当流管型雾化器的雾化流管未通入流体时，其阻抗最小值为 518 kHz。如图 3-4（b）至图 3-4（i）所示，当雾化流管分别通入煤油、脂肪酸甲酯和不同粘度的甘油混合物后，其阻抗最小值均为 518 kHz。流管型雾化器负载时的阻抗最小值与未通入流体空载时的阻抗最小值相等，这说明压电陶瓷的性能对流管型雾化器的谐振频率起到关键影响作用，而流体流动性对流管型雾化器的刚度影响较小。这是由于通入到雾化流管内的待测流体的体积较小，所以雾化流管内的流体变化不会对流管型雾化器的谐振频率造成影响。因

中国知网 https://www.cnki.net

此，在后续关于流管型雾化器的实验中，本文可以忽略流体粘度变化对流管型雾化器谐振频率的影响。

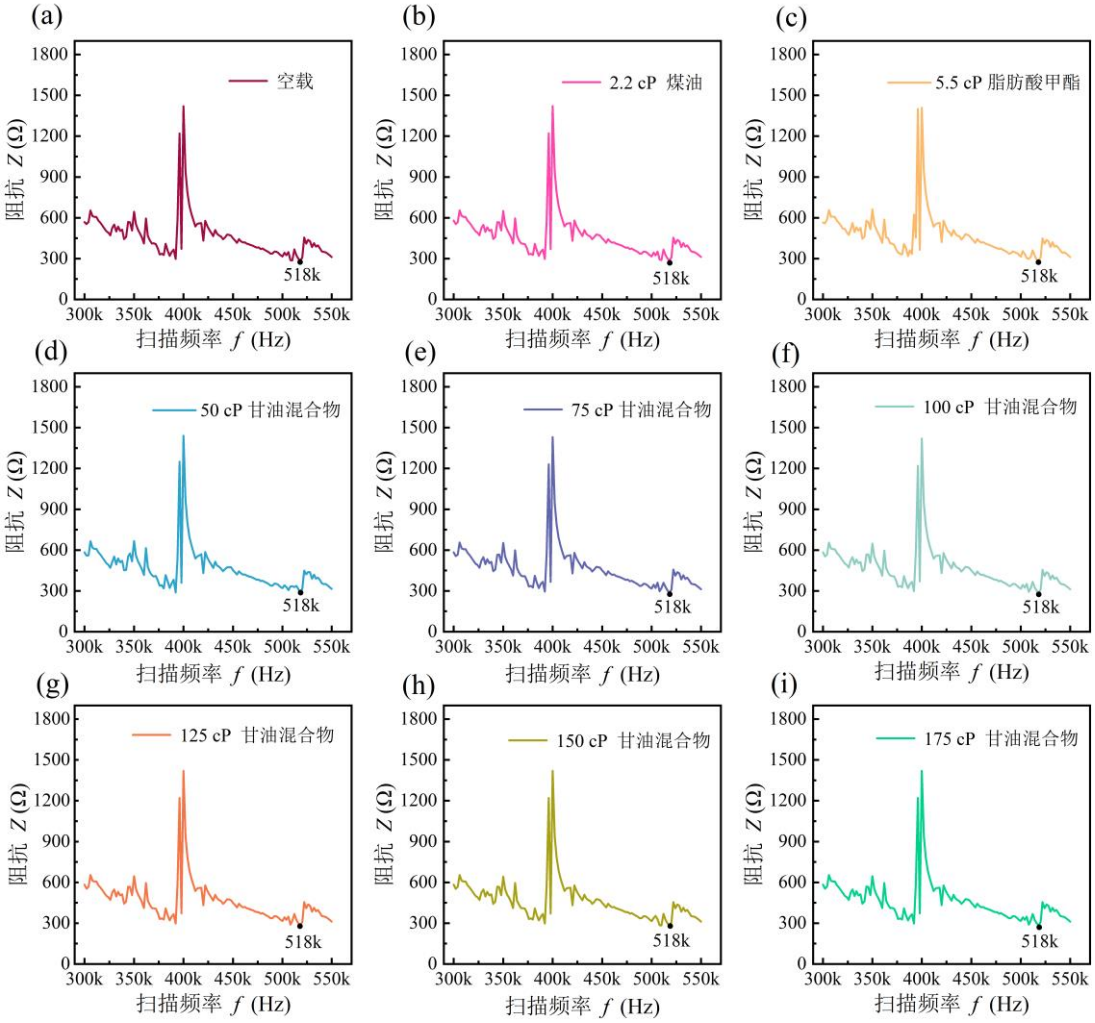


图 3-4 流管型雾化器阻抗分析结果：（a）空载；（b）2.2 cP 煤油；（c）5.5 cP 脂肪酸甲酯；（d）50 cP 甘油混合物；（e）75 cP 甘油混合物；（f）100 cP 甘油混合物；（g）125 cP 甘油混合物；（h）150 cP 甘油混合物；（i）175 cP 甘油混合物

Fig. 3-4 Impedance analysis results of flow tube atomizer: (a) No load; (b) 2.2 cP kerosene; (c) 5.5 cP fatty acid methyl esters; (d) 50 cP glycerin mixture; (e) 75 cP glycerin mixture; (f) 100 cP glycerin mixture; (g) 125 cP glycerin mixture; (h) 150 cP glycerin mixture; (i) 175 cP glycerin mixture

3.2.3 雾化速率实验

雾化速率是表征流管型雾化器的雾化性能最重要的数据，雾化速率越大，雾化粘度高，则流管型雾化器的雾化性能越好。为了证明流管型雾化器的高粘度流体雾化性能及特征，对其进行雾化速率测试。

中国知网 https://www.cnki.net

流管型雾化器的雾化速率测试原理如图 3-5 所示。由于电子分析天平精度较高，达到 0.0001 g，因此为了避免环境因素对测量结果的影响，实验常温下室内无风无振动干扰的环境下进行。所有实验装置及仪器放置于精密光学平台上，同时利用双面胶带将流管型雾化器底座固定在升降平台上。雾化速率测试实验采用流体介质为脂肪酸甲酯（动力粘度为 5.5 cP）和动力粘度分别为 50 cP、75 cP、100 cP、125 cP、150 cP 和 175 cP 的甘油混合物。其中，以粘度较低的脂肪酸甲酯作为雾化速率实验的对照流体，流管型雾化器的交流信号驱动电压范围设置为 65 V-85 V，交流信号驱动电压步长为 2 V。通过初步实验测试得到流管型雾化器的在驱动频率为 507 kHz 时雾化效果最明显，雾化实验测得的最佳工作频率与阻抗分析测得的频率相差 11 kHz，因此雾化速率实验设置流管型雾化器的交流信号驱动电压为 507 kHz。之后探究不同驱动电压和不同粘度流体对流管型雾化器的雾化速率影响。

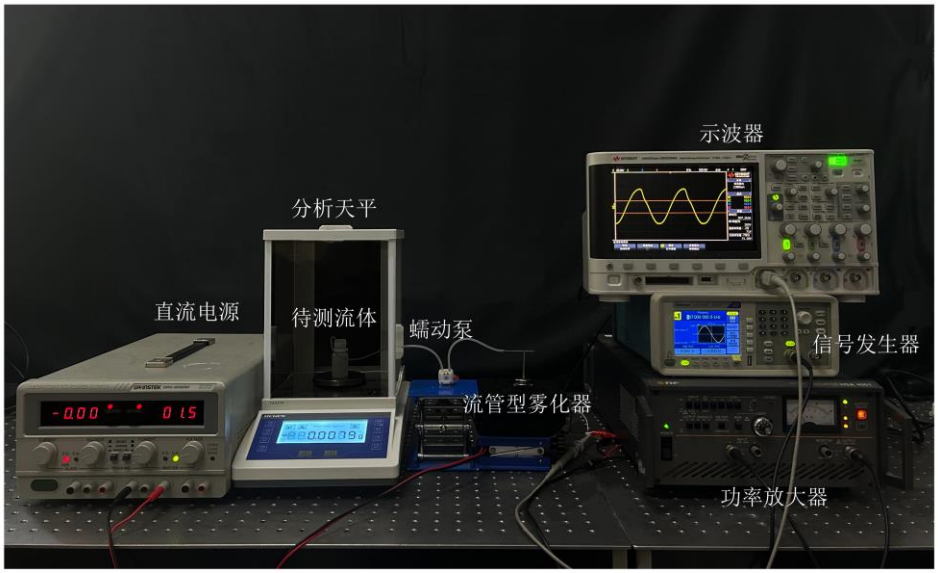


图 3-5 雾化速率测试实验装置

Fig. 3-5 Experimental setup for atomization rate measurement

实验开始前，需要确保雾化流管内充满待测流体，当整个流路充满待测流体后，将硅胶导管的进口端伸入盛有待测流体的硅胶瓶中，且硅胶导管出口端则与雾化流管相接。升降平台用于调节流管型雾化器的高度，将雾化流管与硅胶瓶内的液面调节至齐平，避免雾化流管与待测流体的高度差对实验结果的影响。

实验开始时，直流电源驱动蠕动泵，将待测流体输送至雾化流管内，开启信号发生器输出交流信号，之后打开功率放大器将交流信号放大处理后作用于流管型雾化器，示波器实时监测流管型雾化器上的型号变化。当流管型雾化器开始雾化后，调节蠕动泵驱

中国知网 https://www.cnki.net

动电压，直至雾化量达到最大后，利用电子分析天平测量硅胶瓶内流体变化，秒表用于记录雾化时间，最后待测流体的减少量即为流管型雾化器的雾化量。每组雾化实验测量的总时长为 20 s，通过计算得到不同粘度流体在不同交流信号驱动电压下的雾化速率。需要注意的是对不同粘度流体进行实验时，需要将上一组实验留存在雾化流管以及硅胶导管内的流体排空，以确保实验结果的准确性。

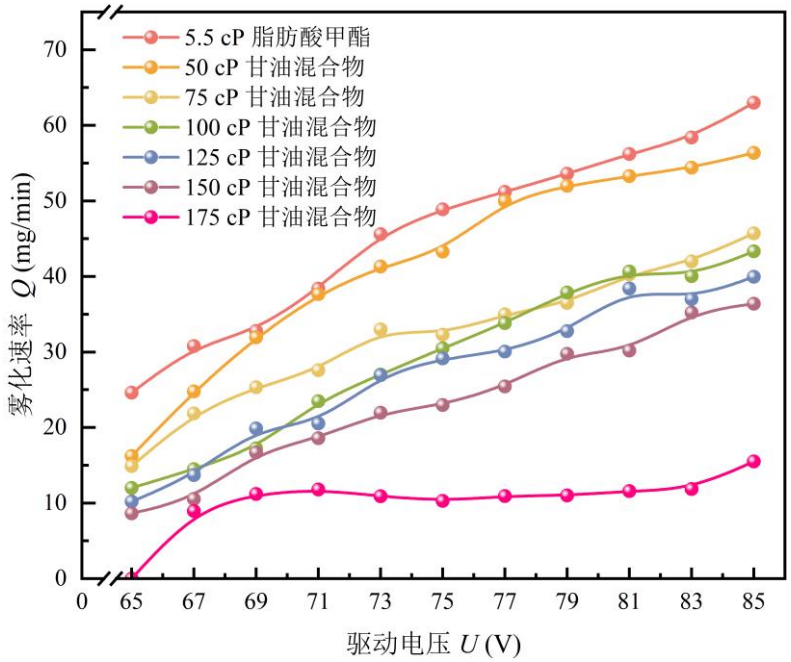


图 3-6 常温下雾化速率实验结果

Fig. 3-6 Atomization rate experiment results at room temperature

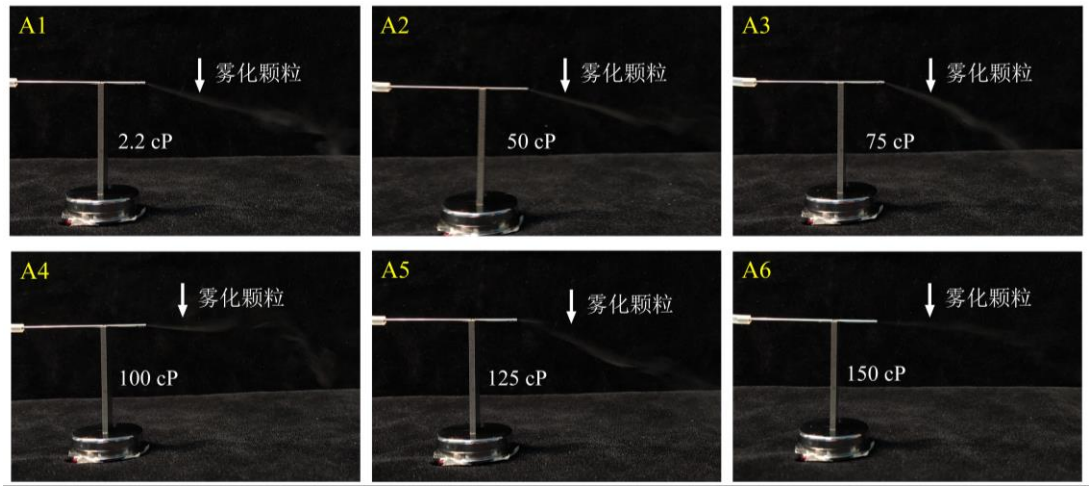


图 3-7 雾化效果图

Fig. 3-7 Atomization effect diagram

如图 3-6 为流管型雾化器在常温下测得的雾化速率随驱动电压的变化图。其中，流体动力粘度分别为 5.5 cP、50 cP、75 cP、100 cP、125 cP、150 cP 和 175 cP。从图中可

中国知网 https://www.cnki.net

以分析得到，随着流管型雾化器驱动电压的升高，脂肪酸甲酯与甘油混合物的雾化速率均呈现上升的趋势，驱动电压为 65 V 时雾化速率最小，在该交流信号驱动电压下，动力粘度为 5.5 cP 的脂肪酸甲酯雾化速率为 24.6 mg/min，动力粘度为 175 cP 甘油混合物的雾化速率为 0 mg/min。驱动电压为 85 V 时雾化速率最大，在该电压下，动力粘度为 5.5 cP 的脂肪酸甲酯雾化速率为 63 mg/min，动力粘度为 175 cP 甘油混合物的雾化速率为 15.5 mg/min。这是因为交流信号驱动电压的大小决定了压电陶瓷的振动性能，从而决定雾化流管的振动幅值。交流信号的驱动电压越大，对应的雾化流管振动幅值越大。根据式 2-30 可以得到，在驱动频率一定的条件下，雾化流管振动幅值的增大而引起作用于流体的空化核瞬时崩溃压力增大，因此实现雾化速率的提高。

在雾化粘度方面，当雾化器的驱动电压一定时，随着雾化流体粘度的增加，流管型雾化器的雾化速率降低，动力粘度为 175 cP 的甘油混合物雾化速率最低，动力粘度为 5.5 cP 的脂肪酸甲酯雾化速率最高。由式 2-14 可知，流体粘度越高，流体内部分子间的摩擦力和阻力越大，流体在移动或者分散过程中需要消耗更多的能量来克服阻力，在受到振动作用时发生空化效应所需要的空化阈值就越大，空化效应发生的概率就越小，由空化核崩溃作用于流体的压力就越小，最终导致雾化速率减小。因此，当外界向流管型雾化器输入能量（交流信号的驱动电压和驱动频率）一定时，流体粘度越高，作用于流体的能量不能达到流体的空化阈值，空化效应发生的概率减少而降低流管型雾化器的雾化速率，验证了理论分析的正确性。

图 3-7 为流管型雾化器在驱动电压为 75 V，流体动力粘度为 5.5 cP、50 cP、75 cP、100 cP、125 cP 和 150 cP 下测得雾化效果图。如图 A1-A6 所示，当流管型雾化器在交流信号驱动电压和驱动频率一定时，随着雾化流体粘度的提高，雾化量越大，雾化效果越明显。雾化速率实验证明流管型雾化器高粘度流体雾化的性能，验证了理论分析和有限元仿真的正确性。

3.3 本章小结

本章对空化核溃灭进行了有限元仿真研究，同时搭建本文流管型雾化器的实验平台，进行了流管型雾化器的阻抗分析和雾化性能测试，主要工作内容如下：

（1）根据理论分析的结果，对空化核在外力作用下的溃灭情况进行有限元分析。仿真结果显示空化核在外力作用下发生塌缩，并向流体释放巨大的瞬时崩溃压力。流体受

中国知网 https://www.cnki.net

力最大值与初始值压力差近 73.1 倍，动力粘度为 100 cP 的高粘度甘油混合物在强大的瞬时崩溃压力作用下实现雾化。仿真与实验结合，解释了流管型雾化器高粘度流体雾化的工作原理。

（2）搭建实验平台，进行流管型雾化器的阻抗分析实验，探究不同粘度流体输送到流管雾化器后的阻抗变化。实验证明流管型雾化器的阻抗不会随着流体粘度的变化而变化，因此在后续实验中可以忽略流体粘度变化对流管型雾化器谐振频率的影响。阻抗分析得到的流管型雾化器阻抗最小值为 518 kHz，而通过初步雾化速率实验证明最佳雾化频率为 507 kHz，二者相差 11 kHz，因此后续实验均使用雾化最佳频率作为工作频率。

（3）进行常温下流管型雾化速率实验，测量不同粘度流体在不同交流信号驱动电压下的雾化速率。实验结果显示，对于相同粘度的流体，雾化速率随着驱动电压的增大而增加。在驱动电压一定时，流体粘度越大，雾化速率越低。并且在驱动电压为 80 V 时，动力粘度为 175 cP 甘油混合物的雾化速率为 15.5 mg/min，超出目前常温下超声雾化粘度记录的 5.5 倍。雾化速率实验证明流管型雾化器高粘度流体雾化的性能，验证了理论分析和有限元仿真的正确性。

中国知网 https://www.cnki.net

第四章 流管型雾化器的空化效应验证

上一章根据流管型雾化器的理论分析的结果，进行了超声空化有限元分析，验证了理论分析的可行性。之后对流管型雾化器的雾化性能进行了实验研究，证明了流管型雾化器的高粘度流体雾化的特性。为了更加深入地展示流管型雾化器的雾化机理，对流管型雾化器的空化效应进行全光谱实验、空化雾化观测实验和拉曼分析实验，对流管型雾化器的空化效应进行验证。

4.1 全光谱分析

4.1.1 全光谱分析原理

全光谱分析是一种通过测量目标物体在整个光谱范围内的吸收、发射或散射特性来获取详细信息的分析技术，其原理是基于物质对光的吸收、反射和发射。当光线从一个物体通过时，它会与物体发生相互作用，其中部分能量会被物体所吸收，部分能量会被物体发射或反射。在光被吸收、反射和发射的过程中，物体会对不同波长的光表现出不同的相互作用，从而产生特征性的光谱，全光谱分析原理如图 4-1 所示。当光源发射一束可见光经过物体时，由于物体内部分子的相互作用或者外界因素干扰导致物体发生变化，这时部分能量会被物体吸收和反射，另一部分能量会穿过物体发射出去，而能量被反射和吸收取决于物体的性质和物体内部变化。为了更好地获取物体吸收和反射光源的数据，在物体后面对准光源发射方向设置接收装置。

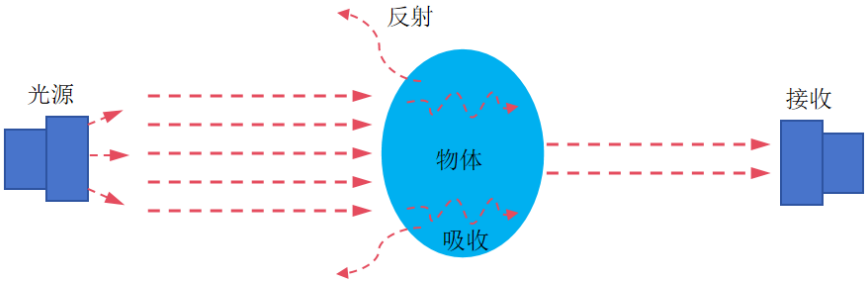


图 4-1 全光谱分析原理

Fig. 4-1 Principle of full-spectrum analysis

在流管型雾化器的空化效应检测中，由于雾化流管内径小的原因，难以对雾化流管内部空化雾化现象进行观测分析。因此，借助全光谱分析验证流管型雾化器雾化过程中的空化效应。

中国知网 https://www.cnki.net

4.1.2 全光谱分析实验

流体中存在气体或蒸汽的情况下，流体受到外界交替作用力而发生空化效应。在空化效应的作用下部分流体压力突然减小或温度的升高，导致气体或蒸汽的溶解度降低，从而形成气泡。当气泡在流体中聚集并逐渐增大，并且气泡聚集到一定量时，流体就会发生乳浊现象，流体乳化原理如图 4-2 所示。以雾化流管受弯曲交替作用力为例，雾化流管内流体受到交变作用力 f_{u_2} 作用时，雾化流管内流体沿着竖直方向不断地被压缩和拉伸。即雾化流管相对于水平状态向上和向下弯曲，使得流体受到强大的竖直拉力作用而产生负压，溶解在流体内的空化核被剥离逐渐增大，随着空化核的数量增加而使得流体产生乳化作用。

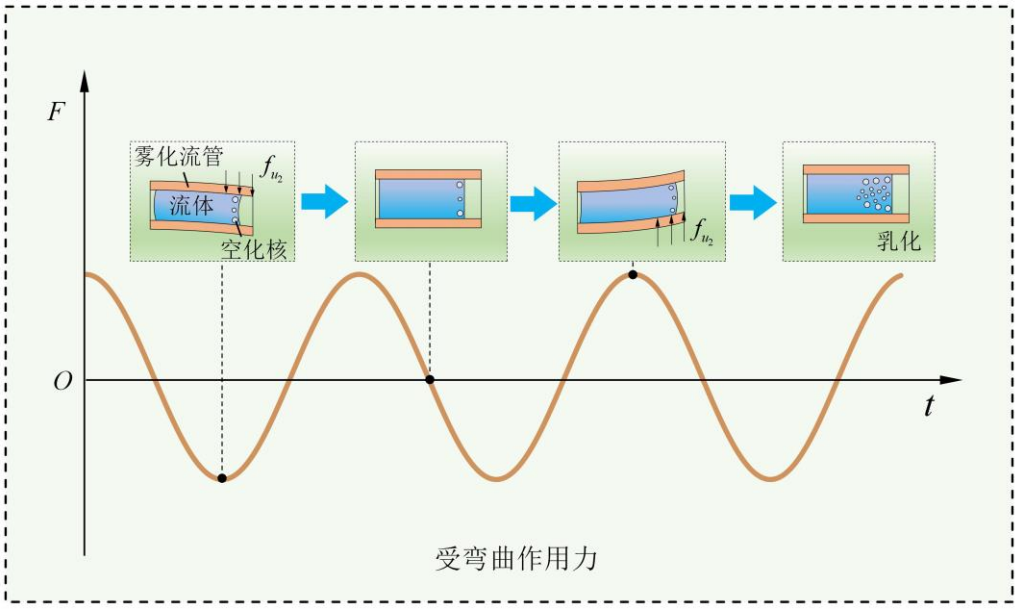


图 4-2 流体乳化原理图

Fig. 4-2 Principle of liquid emulsification

乳浊液吸光度远大于透明流体，因此可以利用乳浊液吸光度和透明液体吸光度不同的原理，即通过对比流管型雾化器在雾化前和雾化时流体的吸光度，分析流管型雾化器雾化过程中是否发生空化效应。由于流管型雾化器的雾化流管内径较小，流管型雾化器工作过程中雾化流管内部流体变化情况难以被观察，因此利用高功率可见红外线光源通过光纤伸入雾化流管内进行观测。

如图 4-3 所示为全光谱分析实验装置图。实验开始前，首先将高功率可见红外光源的发射端光纤从雾化流管入口端伸入流管内部，同时使光纤发射端端面与雾化流管的雾化端口端面距离为 3 mm-5 mm，并将光源的接收端光纤放置于雾化端口外 3 mm-5 mm

中国知网 https://www.cnki.net

处。之后利用蠕动泵，将动力粘度为 50 cP 的甘油混合物泵送至雾化流管内，使得甘油混合物充满整个雾化流管。同时为了使接收端光纤更好接收发射端光纤发出的光线，需要调节位移平台，以保证接收端光纤与发射端光纤始终共线。待光纤位置调节完成后，打开高功率可见红外光源和光谱探测器，记录未开启流管型雾化器时雾化流管内部流体的光强和吸光度。之后，在不改变任何条件的情况下，打开信号发生器输出交流信号，功率放大器将交流信号放大后作用于流管型雾化器而开始工作，待工作稳定后，记录雾化后的吸光度。

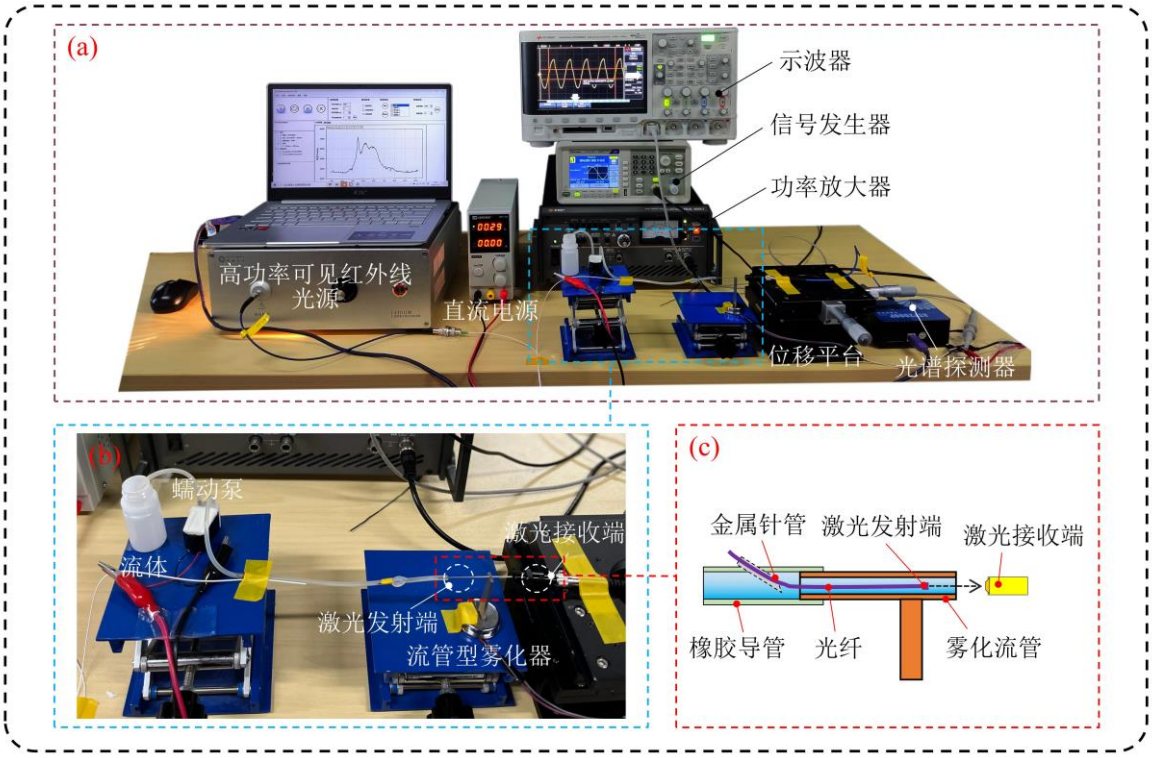


图 4-3 全光谱分析实验装置图：（a）实验平台；（b）雾化系统；（c）全光谱分析实验原理示意图

Fig. 4-3 Experimental setup for full-spectrum analysis: (a) Experimental platforms; (b) Atomization system; (c) Experimental principle of full-spectrum analysis schematic diagram

如图 4-4（a）所示为雾化前高功率可见红外光源通过动力粘度为 50 cP 的甘油混合物后的光强随波长的分布，图中可以得到流管型雾化器雾化前的光强随波长的增大而呈现出先增后减的趋势，并且在波长为 633 nm 时光强达到最大值为 35333 cd。这说明光源从光纤发射端发出的强光，在通过 50 cP 的甘油混合物时，不同波长的强光被流体吸收和反射的量不相同。

假设雾化前后光源接收端的光强分别为 I_a 和 I_b，因此雾化时雾化流管内吸光度可以被定义为[55]：

中国知网 https://www.cnki.net

$$A = \lg \frac{I_a}{I_b} \tag{4-1}$$

其中，A 为雾化后雾化流管内吸光度，I_a 为雾化前光源接收端的光强，I_b 为雾化后光源接收端的光强。

当流管型雾化器未开启工作时，雾化前后光源接收端的光强相等，即 I_a=I_b，因此理论计算得到的整个波长段的吸光度为：

$$A = \lg \frac{I_a}{I_b} = 0 \tag{4-2}$$

然而，图 4-4（b）显示了通过实验测得雾化前的吸光度，与理论计算的雾化前吸光度相比，实验测得的雾化前吸光度在 0 值附近上下跳动，这是由于受到环境因素的影响，实际用仪器测量的雾化前吸光度存在一定的误差。

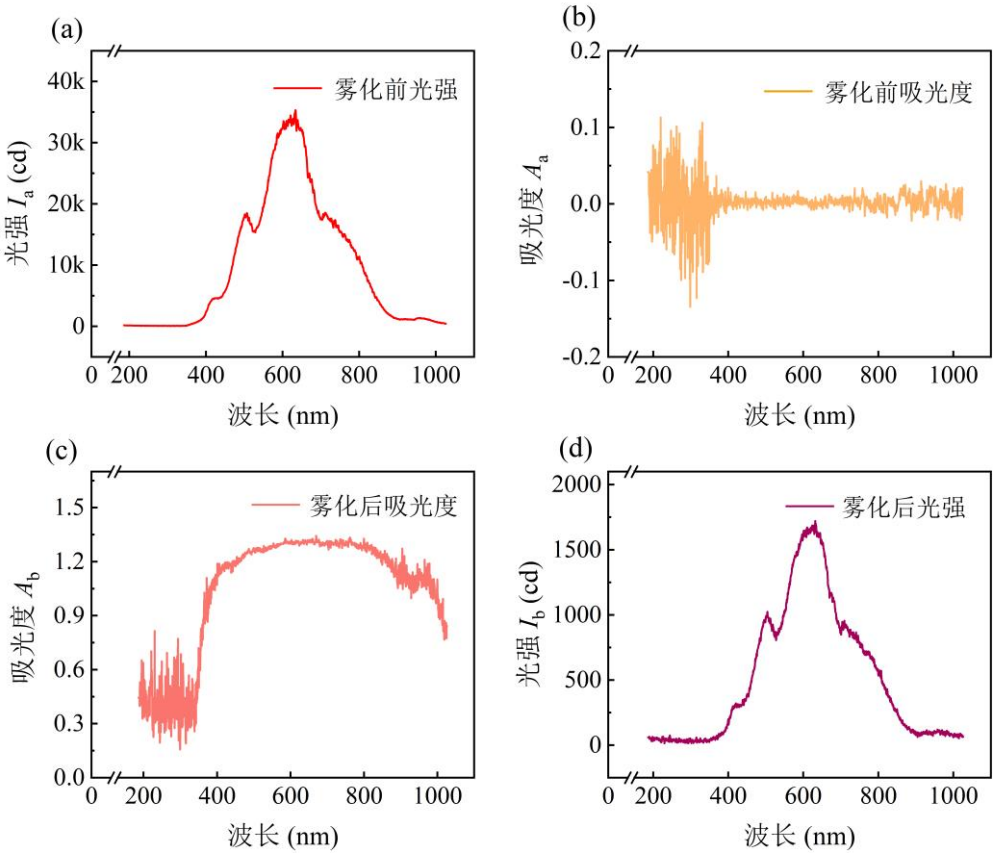


图 4-4 流管型雾化器的全光谱分析结果：（a）雾化前光强；（b）雾化前吸光度；（c）雾化后吸光度；（d）雾化后光强

Fig. 4-4 Results of full-spectrum analysis for flow tube atomizer: (a) Light intensity before atomization; (b) Absorbance before atomization; (c) Absorbance after atomization; (d) Light intensity after atomization

中国知网 https://www.cnki.net

如图 4-4（c）所示为流管雾化器开启工作后测得的雾化流管内的吸光度，由图中可以分析得到，流管型雾化器开启工作后的吸光度与雾化前的吸光度相比，雾化后的吸光度值明显增高。当波长为 400 nm-900 nm 时，吸光度值变化最大，吸光度值在 0.9-1.4 的范围内变化。因此，通过对比雾化前和雾化后的吸光度值，能够很好地证明流管型雾化器在雾化过程中，由于空化效应的作用导致流体流动性发生变化，进而引起光被流体吸收和反射的量发生变化。同时，为了更为直观地对比和分析，根据实验测得的雾化流管内雾化前光强和雾化后吸光度，并利用式（4-1）可以反推得到雾化流管内雾化后的光强变化，如图 4-4（d）所示。将流管型雾化器雾化前与雾化后的光强进行对比，能够明显的分析得到，光强谱峰在波长位置分布上并没有发生变化。然而，经过流管型雾化器雾化后的光强强度比雾化前的光强强度减少近 20 倍。因此，通过将雾化流管内雾化前和雾化后的吸光度值的对比，转化为雾化前和雾化后的光强强度的对比，可以分析得到流管型雾化器在发生雾化的过程中，雾化流管内部发生剧烈的空化效应进而导致光强和吸光度的变化。

由此可以得出以下结论：流管型雾化器雾化过程中，由于雾化流管的振动，导致内部流体受到拉力和压力交替变化后发生理论分析和有限元分析中所述的空化现象。同时，在流体发生空化现象的过程中产生大量微小气泡使得流体从透明色变为乳白色，导致流体吸收和反射了更多的光，因此流体吸光度变高，接收端的光强降低。该实验现象与结论进一步验证了理论分析和有限元分析的可靠性，证明了流管型雾化器在雾化过程中存在流体空化现象。

4.2 空化雾化观测实验

全光谱分析实验表明雾化后光源接收端的光强比雾化前减少近 20 倍，证明了流管型雾化器在雾化过程中发生剧烈的空化现象。为了进一步观测雾化出口的流体变化情况，本研究利用摄像机设备对雾化出口进行观测，空化雾化观测实验装置原理如图 4-5 所示。其中，摄像机设备的捕捉频率设置为 120 fps，并且将镜头放大对焦至流管型雾化器的雾化出口端。之后利用直流电源驱动蠕动泵，将动力粘度为 50 cP 的甘油混合物输送至雾化流管内。待雾化流管充满流体后，打开信号发生器、功率放大器和示波器。信号发生器用于输出交流信号，功率放大器将交流信号放大后作用于流管型雾化器上，示波器实时监测流管型雾化器上的驱动电压和驱动频率。同时设置流管型雾化器交流信号驱动电

中国知网 https://www.cnki.net

压为 76 V，驱动频率为 507 kHz。待驱动参数设置完成后，开启摄像机开始录像，之后打开流管型雾化器直至雾化时间达到 10 s 以上，记录雾化出口从通电后到雾化后流体的变化过程。

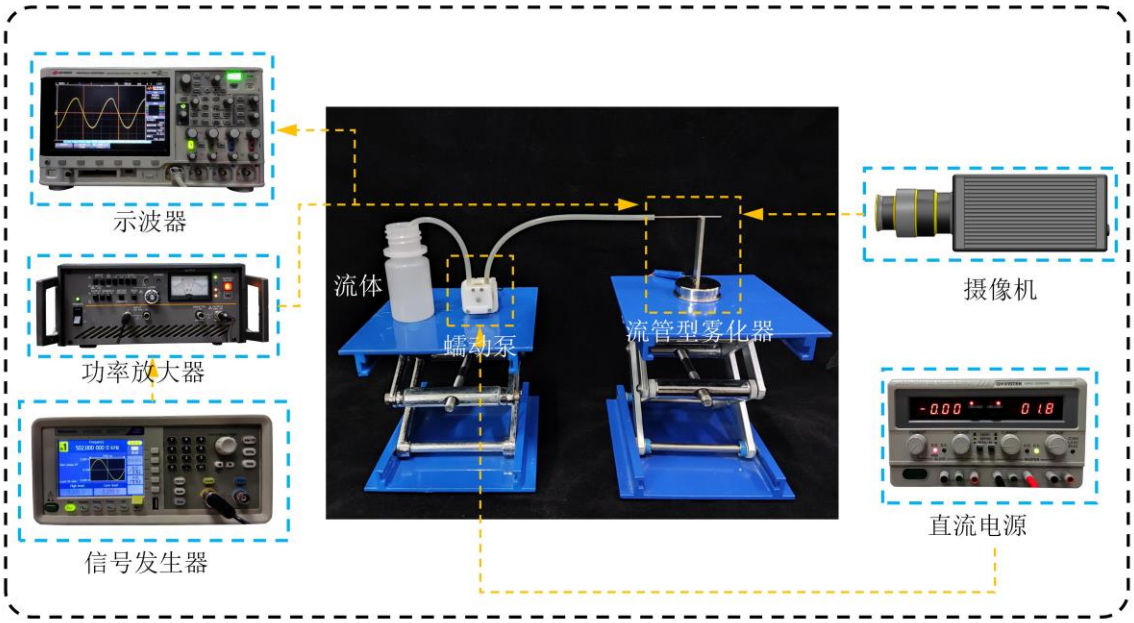


图 4-5 空化雾化观测实验原理图

Fig. 4-5 Schematic diagram of cavitation atomization observation experiment

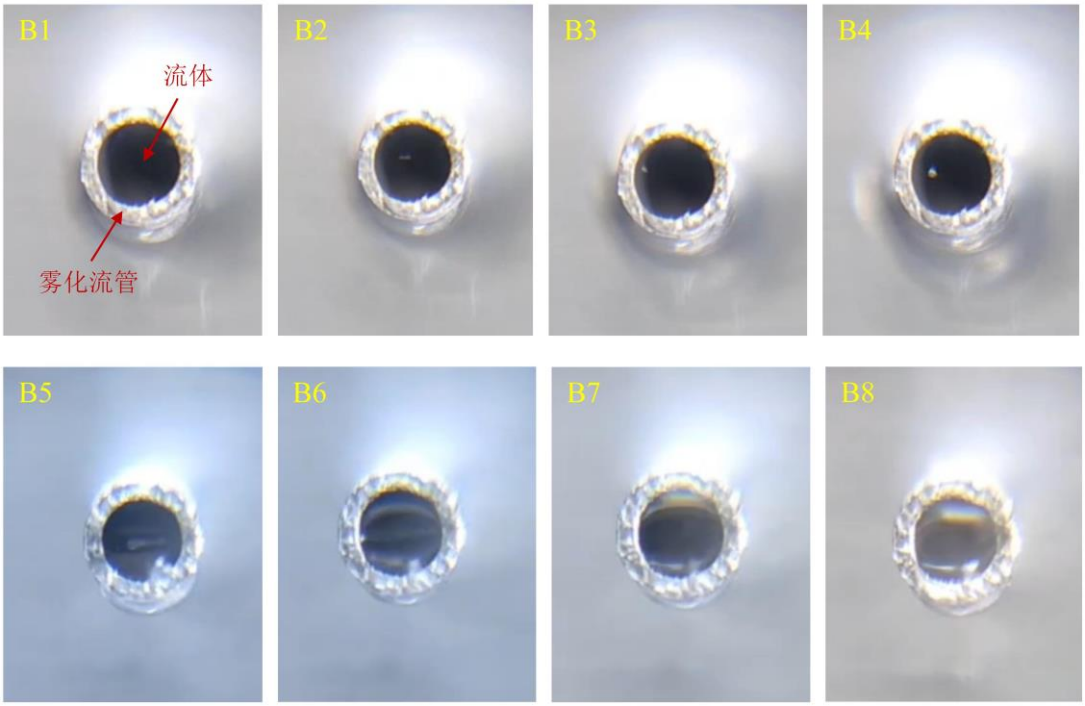


图 4-6 空化雾化观测结果

Fig. 4-6 Results of cavitation atomization observation

中国知网 https://www.cnki.net

如图 4-6 所示为空化雾化观测实验结果。如图 B1 所示，当流管型雾化器未开启工作时，雾化流管内流体呈透明色，并且无气泡产生。如图 B2-B4 所示，当开启流管型雾化器后，雾化流管内陆续产生微小气泡并且向雾化流管端口移动，这是因为雾化流管内部流体受到拉力和压力交替作用发生空化效应，溶解在流体内的空化核被剥离出来吸收能量不断膨胀、收缩。如图 B5-B8 所示，雾化流管内流体发生雾化，而雾化流管端面截面流体呈椭圆形状，并且面积随时间变化而变化。这是因为大量空化核吸收能量不断膨胀、收缩直到溃灭释放出强大的瞬时崩溃压力作用于流体，导致流体雾化。并且靠近上下管壁区域，空化效应发生的强度更剧烈，因此该区域流体优先被雾化。空化雾化观测实验证明了流管型雾化器在雾化过程中存在流体空化现象。

4.3 雾化前后流体拉曼分析

拉曼光谱原理是基于拉曼散射效应，这是一种光与物质相互作用的现象。当单色光（通常是激光）照射到测试物质上时，大部分光会以相同频率散射出去，这部分称为瑞利散射。然而，其中有一小部分的光会发生能量转移，导致散射光的频率与入射光的频率不同，这部分被称为拉曼散射。每个物质的拉曼光谱图中都存在着一定的拉曼峰，而每个拉曼峰的位置决定了官能团的种类，拉曼峰的高度决定了该位置下官能团的浓度，因此拉曼光谱测试可以有效地分析待测物质的性质。



图 4-7 拉曼光谱测试装置图

Fig. 4-7 Experimental setup for Raman spectroscopy analysis

中国知网 https://www.cnki.net

为了证明经过流管型雾化器雾化后流体的化学性质是否发生改变，验证流管型雾化器的工作稳定性，证明流管型雾化器的雾化过程是物理变化。同时间接证明流管型雾化器振动时，雾化流管内部流体发生空化效应的剧烈程度。该实验以动力粘度为 50 cP 的甘油混合物为例，并且利用自对焦显微拉曼成像光谱仪作为测试仪器，将经过流管型雾化器雾化前和雾化后的甘油混合物分别进行拉曼光谱分析，拉曼光谱分析的实验装置如图 4-7 所示。

实验开始前，需要利用清洁干净的硅胶瓶收集雾化颗粒，具体操作是将硅胶瓶瓶身倾斜向上，并且将硅胶瓶的瓶口对准雾化流管的雾化出口端。待雾化颗粒喷入硅胶瓶内腔，再用胶头滴管收集附着在硅胶瓶瓶身内的液滴。实验开始时，首先利用胶头滴管分别将动力粘度为 50 cP 的甘油混合物原液以及雾化后收集的流体分别滴入到载玻片上。之后，将载玻片上覆盖流体的区域对准拉曼光谱仪镜头的中央，最后打开自对焦显微拉曼成像光谱仪，开始测试。

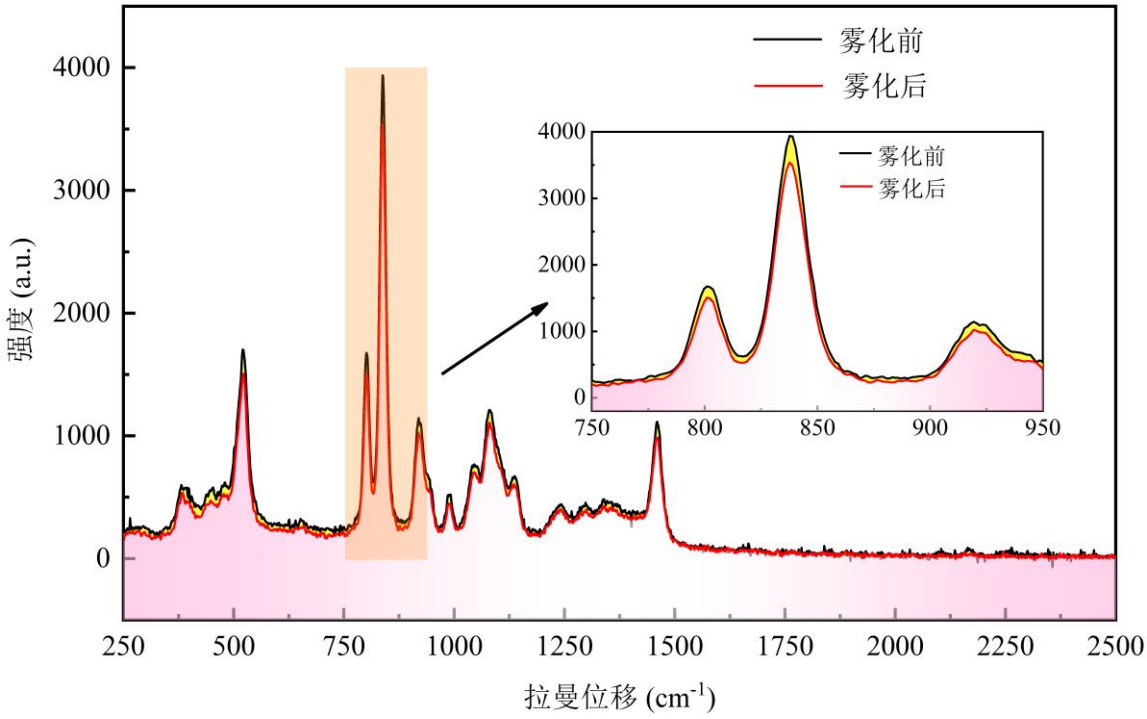


图 4-8 雾化前后拉曼光谱对比

Fig. 4-8 Raman spectra comparison before and after atomization

经过流管型雾化器雾化前和雾化后的拉曼光谱如图 4-8 所示，图中不同拉曼峰在拉曼位移上的位置代表着不同的官能团，而各个拉曼峰的强度代表对应官能团的浓度。通过对雾化前的甘油混合物和雾化后收集到的流体进行拉曼光谱对比，可以分析得到其两

中国知网 https://www.cnki.net

者拉曼峰分布的位置无任何变化。而在拉曼峰的强度上，雾化前的拉曼峰强度比雾化后的拉曼峰强度稍微高一点，即雾化前的官能团浓度高于雾化后的官能团浓度。考虑雾化后的雾滴是通过硅胶瓶收集，所以有少量雾滴飘散到空气中，导致收集到的雾滴中有的官能团浓度降低。

总结而言，该实验证明了在去除外界因素的影响后，雾化前和雾化后的流体拉曼光谱没有任何改变，代表着雾化前的甘油混合物和雾化后流体的性质没发生变化。同时拉曼光谱实验也说明了流管型雾化器在实现雾化的同时，保证了流体性质的稳定性。同时也证明了雾化时流体受到振动后的空化程度虽然非常剧烈，但达不到分子层面，而是将连续且尺寸大的液滴变为更加微小的液滴或雾滴，从而在振动过程中，雾滴受力而喷散到空气中。

4.4 本章小结

首先根据超声空化效应使流体发生乳浊化进而导致吸光度发生变化的原理，搭建实验平台，进行了全光谱分析实验。通过对比雾化流管内雾化前和雾化后的光强变化，分析得到流管型雾化器在雾化过程中发生了空化效应。其次，为了进一步观测雾化流管雾化端流体的变化情况，利用摄像机设备对流管型雾化器的雾化出口端进行放大观测，进一步证明雾化过程中发生了剧烈的空化效应。最后对雾化前后的流体进行拉曼分析，验证流管型雾化器的雾化过程属于物理过程，证明流管型雾化器的安全性。上述实验得出结论如下：

（1）进行了全光谱分析实验，实验结果表明流管型雾化器开启工作前测得吸光度在 0 值的范围内变化。而流管型雾化器开启工作后测得的吸光度值在 0.2-1.4 的范围内变化。同时，通过计算得到的雾化后光强与实验测得的雾化前光强相比减少近 20 倍。这是由于空化产生大量微小气泡使得流体从透明色变为乳白色，导致流体吸光度变高，接收端的光强降低。实验结果与理论分析一致，证明流管型雾化器在雾化过程中存在流体空化现象。

（2）进行了空化雾化观测实验，实验结果显示开启流管型雾化器前，雾化流管内流体呈透明色。流管型雾化器开始工作后，雾化流管内陆续有微小气泡生成并逐渐长大。这是因为雾化流管内部的流体受到交替作用力而发生空化效应，空化核被剥离出来吸收能量不断膨胀、收缩。当流管型雾化器开始雾化后，雾化流管内流体截面呈椭圆形状，

中国知网 https://www.cnki.net

并且椭圆面积随时间的变化而变化，这是因为空化效应首先发生在流体靠近管壁区域。由于弯曲振动的作用，靠近上下管壁区域空化效应发生的强度更为剧烈。因此该区域流体优先被雾化喷出。实验结果、理论分析和仿真模拟一致，验证流管型雾化器雾化时存在空化效应。

（3）进行流管型雾化器在常温下雾化前后流体的拉曼光谱分析，实验证明雾化前后产物拉曼光谱无变化，证明了流管型雾化器的雾化稳定性。

中国知网 https://www.cnki.net

第五章 空化参数对雾化性能的影响

上一章通过全光谱分析实验和空化雾化观测，证明了流管型雾化器在雾化过程中发生空化效应，并利用拉曼光谱分析证明了流管型雾化器的稳定性。为了深入剖析流管型雾化器的雾化机制，尤其是空化效应在整个雾化过程中的作用。在流管型雾化器结构参数和驱动参数均一定的前提下，通过对雾化流体进行加热和搅拌两种处理来影响空化强度，进而分析上述处理对雾化性能的影响。

5.1 流体温度和搅拌速率对空化的作用

在研究流体温度和含气量对雾化性能的影响之前，需要分析流体温度和含气量对空化强度的影响。主要通过加热和搅拌两种处理方式来改变流体温度和含气量，进而改变空化强度。流体粘度与蒸汽压[60]、流体粘度与温度[61]的关系可以分别表示为：

$$\eta = \eta_0 \left[1 + B\left(T - T_0\right)\right] \tag{5-1}$$

$$\lg P_{\mathrm{V}} = A - \frac{B}{C + T} \tag{5-2}$$

式中，η 为流体粘度，η_0 是流体在参考温度 T_0 时的粘度，B 是温度系数，T 为流体绝对温度。P_{V} 为流体蒸汽压，A，B 和 C 是物质特性相关常数，式中可以得出流体粘度随着温度的增加而降低。空化核瞬时崩溃压力与流体蒸汽压的关系可以表示为[57]：

$$P_{\max} \sim P_u^4 P_{\mathrm{g}}^{-3} \tag{5-3}$$

其中，在声化学应用中，空化核内气体分压 P_{g} 取流体蒸汽压 P_{V}，因此，空化核瞬时崩溃压力与流体蒸汽压的关系可以表示为：

$$P_{\max} \sim P_u^4 P_{\mathrm{V}}^{-3} \tag{5-4}$$

根据式（2-14）和式（5-1），空化阈值与流体温度的关系可以表示为：

$$P_{\mathrm{B}} = 0.8 \lg\left[\eta_0 + \eta_0 B (T - T_0)\right] + 4 \tag{5-5}$$

根据式（5-2）和式（5-4），空化核瞬时崩溃压力与流体温度的关系可以表示为：

$$P_{\max} \sim 10^{-3\left(\mathrm{A} - \frac{\mathrm{B}}{\mathrm{C}+T}\right)} P_u^4 \tag{5-6}$$

流管型雾化器的雾化流管受到激振力作用时产生周期性振动，当空化核在稳态响应下受到的外力 P_u 大于空化阈值 P_{B} 时，流管内壁流体就会发生空化效应。空化核在极短的时间内吸收能量，随着压力幅值的正负变化而不断收缩、膨胀。当空化核体积收缩到

中国知网 https://www.cnki.net

最小值时发生崩溃，而在崩溃的瞬间产生强大的瞬时崩溃压力 P_{max} 作用于流体而实现雾化，空化核瞬时崩溃压力 P_{max} 是本研究高粘度流体雾化的直接原因。因此，空化阈值越低，空化效应越容易发生，雾化速率就越大。空化核瞬时崩溃压力越大，作用于流体的压力越大，雾化速率就越大。由式（5-5）可以得出流体温度的升高，空化阈值降低，从而提高空化强度，雾化速率也会升高。由式（5-6）可以得出，流体温度的升高，空化核瞬时崩溃压力降低，从而降低了空化强度，雾化速率也会降低，因此在分析温度对雾化速率影响之前，需要分析空化阈值和空化核瞬时崩溃压力两个空化参数的影响。Niemczewski 的研究表明，温度的升高会导致空化强度的双向变化，空化强度随着温度的持续增加而呈现出先增后减的趋势[62]。以此为基础，探究温度导致空化效应的变化进而对雾化效率的影响。

搅拌速率主要影响的是气泡数量，在流体搅拌的过程中，转子旋转的剪切力将流体分散成众多尺寸不同的液团。这些液团在涡旋的作用下增加了与空气接触的机会，使得流体与空气总接触面积增大，从而让流体溶入的气泡增多。搅拌速率和气泡数量成正比关系。随着空化核（微小气泡）数量的增多，一方面将会提高空化效应发生的概率，从而导致空化阈值的降低，进而提高空化强度。但另一方面由于气泡数量过多，在高频振动的过程中，部分存在缺陷的气泡先发生空化效应，而这部分气泡空化效应产生的部分能量将会被其他未发生空化的气泡吸收，从而减小空化核瞬时崩溃压力，导致空化强度降低[63]。以此为基础，探究含气量导致空化效应的变化对雾化效率的影响。

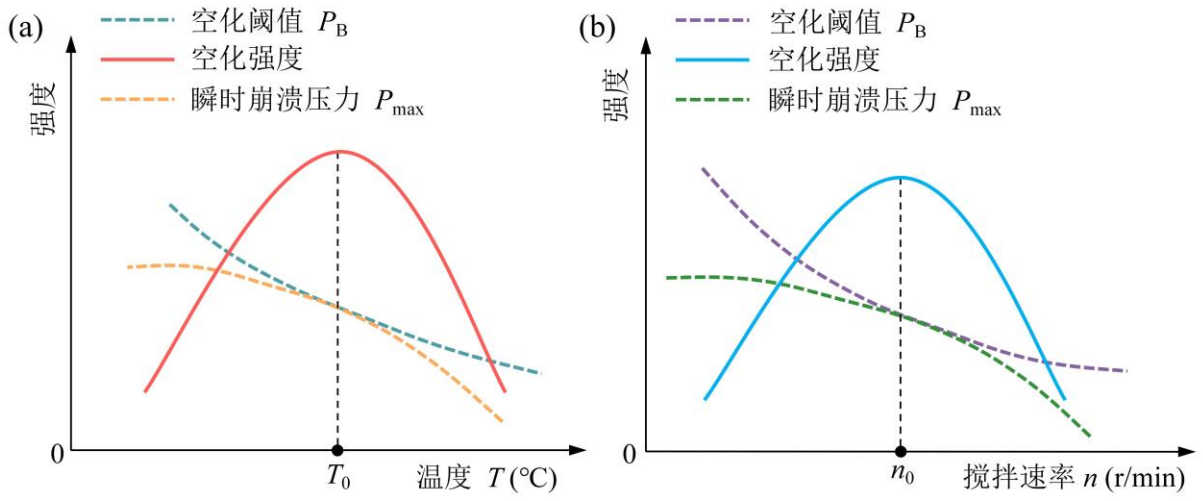


图 5-1 空化参数对空化强度的影响：（a）温度与空化强度的关系；（b）搅拌速率与空化强度的关系

Fig. 5-1 Effect of cavitation parameters on cavitation intensity: (a) Relationship between temperature and cavitation intensity; (b) Relationship between stirring rate and cavitation intensity

中国知网 https://www.cnki.net

根据温度和搅拌速率对空化阈值和空化核瞬时崩溃压力的双向影响，进而分析空化阈值和空化核瞬时崩溃压力对空化强度的双向影响，可以得到如图 5-1 所示的关系。对于流体温度的升高，根据式（5-5）和式（5-6）分析可以得到，降低空化阈值的同时也降低了空化核瞬时崩溃压力。在流体温度低于 T_0 时，空化阈值降低的影响大于空化核瞬时崩溃压力降低的影响，因此空化强度随着流体温度的升高而升高。在流体温度高于 T_0 时，空化阈值降低的影响小于空化核瞬时崩溃压力降低的影响，因此空化强度随着流体温度的升高而降低。对于流体搅拌速率的升高，流体含气量随之升高，降低空化阈值的同时也降低了空化核瞬时崩溃压力，在流体搅拌速率低于 n_0 时，空化阈值降低的影响大于空化核瞬时崩溃压力降低的影响，因此空化强度随着流体搅拌速率的升高而升高。在流体搅拌速率高于 n_0 时，空化阈值降低的影响大于空化核瞬时崩溃压力降低的影响，因此空化强度随着流体搅拌速率的升高而降低[63]。接下来通过改变流体温度和搅拌速率两个条件来改变空化阈值和瞬时崩溃压力两个空化参数，进而改变空化强度，最后讨论空化强度与雾化性能的关系。

5.2 流体温度对雾化性能的影响

为了探究空化强度与雾化性能的因果关系，具体通过提高流体温度，分析空化阈值和空化核瞬时崩溃压力的变化对雾化效率的影响。同时还分析流体温度变化对雾化颗粒和雾化前后拉曼光谱的变化。



图 5-2 粘度测试实验装置

Fig. 5-2 Experimental setup for viscosity measurement

中国知网 https://www.cnki.net

在探究流体温度对流管型雾化器雾化性能的影响之前，分析流体温度和流体粘度之间的关系。首先将动力粘度分别为 50 cP、100 cP、150 cP 和 200 cP 的甘油混合物置于水浴加热锅中加热至规定温度后并且保温 5 分钟，之后利用旋转式粘度计对加热保温后的甘油混合物进行测试，分析甘油混合物在不同温度条件下粘度变化。如图 5-2 所示为粘度测试实验装置。

流体粘度与温度的关系如图 5-3 所示。其中，被测对象是常温下四种不同粘度的流体，动力粘度分别为 50 cP、100 cP、150 cP 和 200 cP，温度变化范围是 30 ℃-90 ℃。实验结果显示流体粘度随着温度的上升而下降，并且，当流体温度在 50 ℃以下时，粘度急剧下降。当流体粘度超过 50 ℃之后，粘度地下降趋势逐渐平缓，流体粘度随温度变化实验结果与式（5-1）一致。

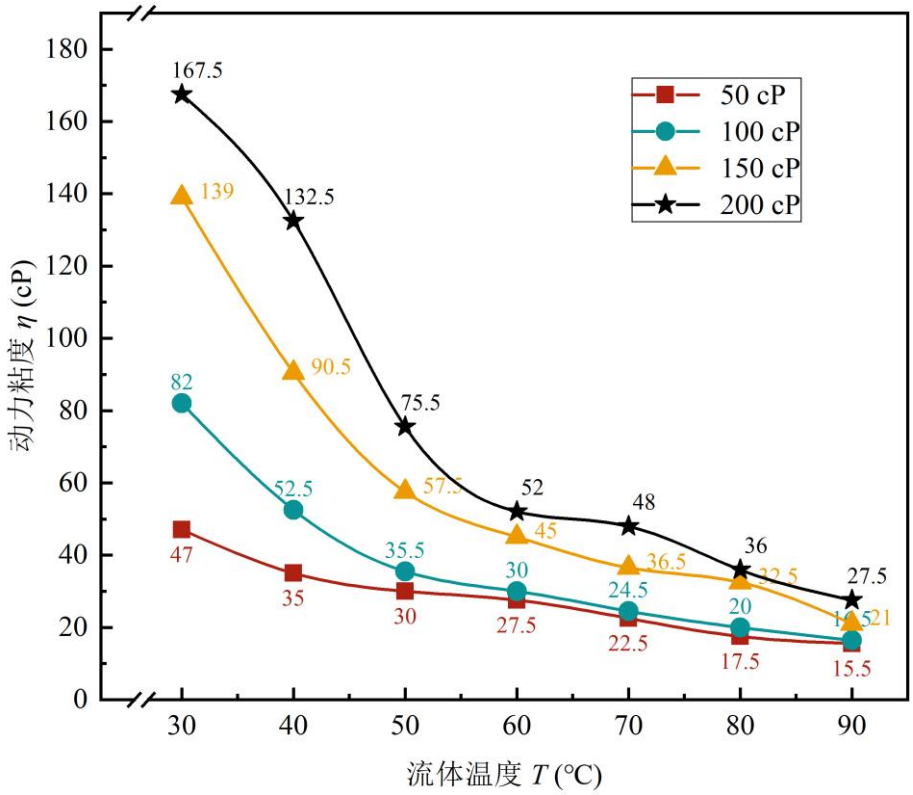


图 5-3 流体粘度随温度变化

Fig. 5-3 Variation of liquid viscosity with temperature

5.2.1 流体温度对雾化速率的影响

为了探究空化强度与雾化速率的关系，通过加热流体的处理方式来改变空化强度，进而分析雾化速率的变化。利用水浴加热的方式对流体进行加热处理，之后将加热处理

中国知网 https://www.cnki.net

后的流体进行雾化速率测试实验。图 5-4 为加热雾化的实验装置图，利用水浴加热锅对不同粘度的流体进行加热处理，并且保温相同时间。之后利用直流电源驱动蠕动泵，将加热保温处理后的流体输送至雾化流管内。待雾化流管充满待测流体，开启信号发生器输出交流信号，功率放大器将交流信号放大后作用于流管型雾化器而实现雾化，示波器能够监测作用于流管型雾化器的电信号波形、工作频率和工作电压。最后记录雾化效果最好时直流电源的电压。

需要注意的是，为了减小流体温度的损失对实验结果造成误差，在流管型雾化器的雾化速率的测量中，并没有将加热保温后的流体放入高精度分析天平中直接测量雾化量。而是将待测流体置于水浴加热锅中，利用蠕动泵，将正在保温的流体直接泵送至流管型雾化器中直接雾化。并且在雾化速率测试的过程中实时记录雾化时蠕动泵的最大驱动电压，最后利用高精度天平测量该驱动电压下流管型雾化器单位时间内的泵送量，即为最终的雾化速率。并且，在进行下一组雾化速率测量试验时，必须将上一组实验中残留在雾化流管内的流体排空，保证实验的准确性。

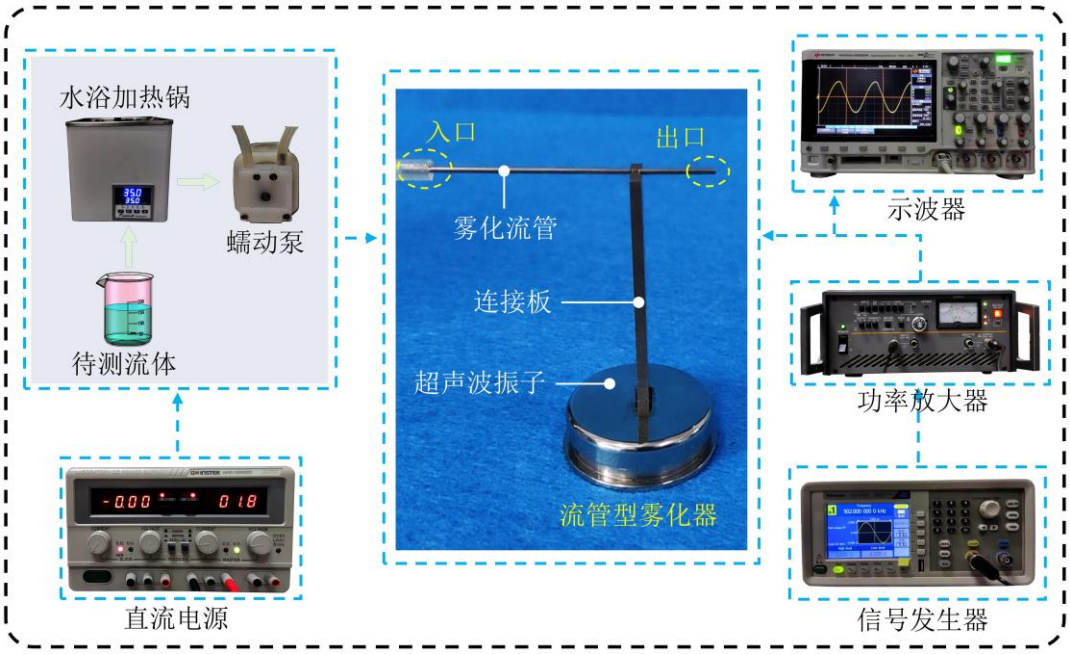


图 5-4 流体加热雾化实验装置

Fig. 5-4 Experimental setup for atomization with liquid heating

实验过程中分别使用动力粘度为 50 cP、100 cP、150 cP 和 200 cP 的甘油混合物在不同温度下进行雾化速率测试。在保证流体化学性质不受温度影响的前提下，对甘油混合物进行加热并保温 5 分钟，加热温度分别为 25 ℃、30 ℃、35 ℃和 40 ℃。同时，交流信号的驱动电压从 70 V 依次升高到 80 V，以 2 V 为间距共完成 6 组雾化速率的测量

中国知网 https://www.cnki.net

实验，流体加热雾化实验结果如图 5-5 所示。

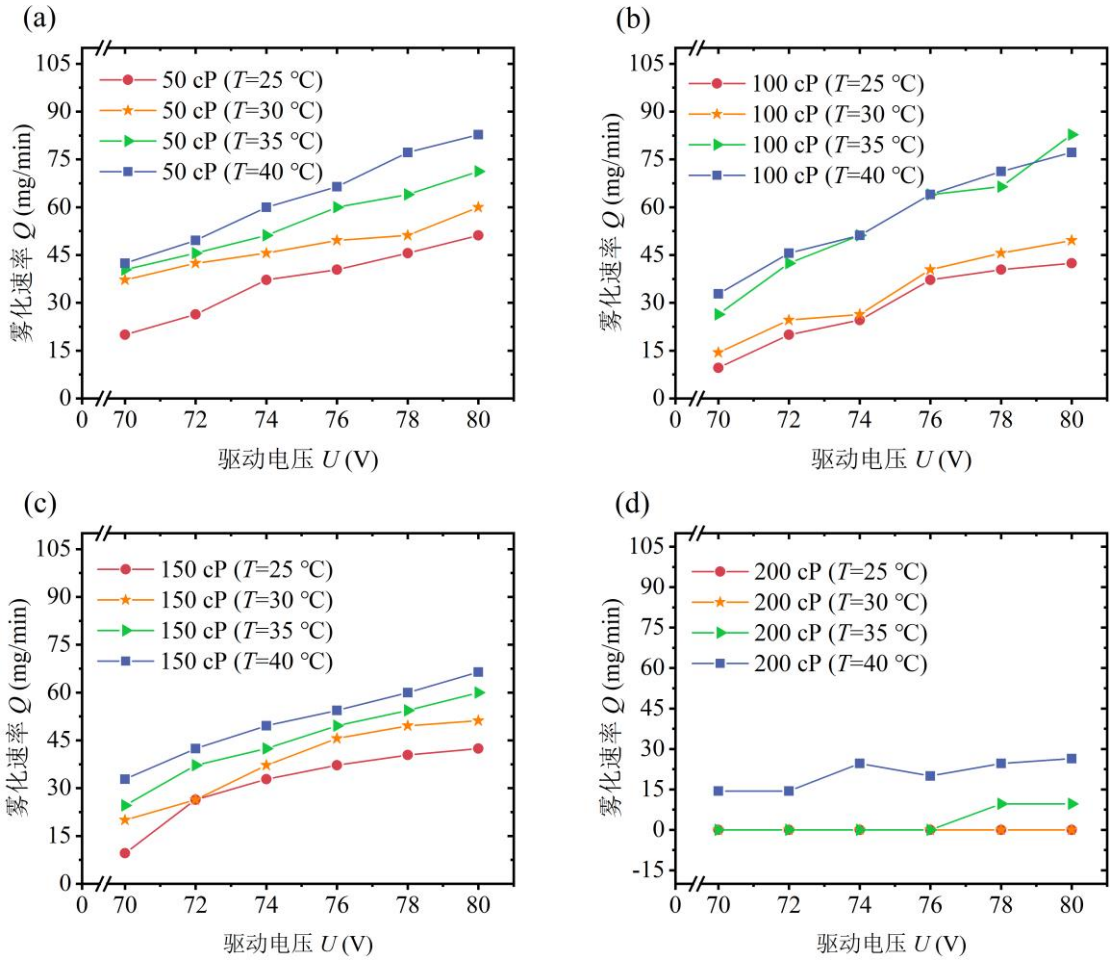


图 5-5 不同温度下雾化速率随驱动电压的变化：（a）50 cP 甘油混合物；（b）100 cP 甘油混合物；（c）150 cP 甘油混合物；（d）200 cP 甘油混合物

Fig. 5-5 Variation of atomization rate with driving voltage at different temperatures: (a) 50 cP glycerin mixture; (b) 100 cP glycerin mixture; (c) 150 cP glycerin mixture; (d) 200 cP glycerin mixture

图 5-5 展示了不同温度下流管型雾化器的雾化速率随驱动电压的变化关系。其中，图 5-5（a）至 5-5（d）分别展示了流体粘度为 50 cP、100 cP、150 cP 和 200 cP 时雾化速率随驱动电压和温度的变化关系。实验结果表明，对于相同粘度的流体，在相同交流信号的驱动电压下，雾化速率随着流体温度的升高而增加。如图 5-5（a），流体粘度为 50 cP，温度为 40 ℃时，流管型雾化器的最大雾化速率为 82.8 mg/min，流体温度为 25 ℃时，雾化速率为 51.2 mg/min。流体动力粘度为 50 cP，温度从 25 ℃加热到 40 ℃时，流管型雾化器的雾化速率提高 61.7%。当流体温度为 25 ℃-40 ℃时，雾化速率升高，根据式（5-5）和式（5-6）分析可以得到，温度升高引起空化阈值和空化核瞬时崩溃压力的降低，而空化阈值降低的影响大于空化核瞬时崩溃压力降低的影响，因此导致空化强度

中国知网 https://www.cnki.net

升高，雾化速率提高。对于粘度和加热温度相同的流体，流管型雾化器的雾化速率随着交流信号的驱动电压增加而增加，这是因为驱动电压增加而导致雾化流管的振动幅值的增大，从而提高空化强度，实现更高的雾化速率。流体加热雾化实验证明，通过加热流体来提高空化强度可以有效地提高流管型雾化器的雾化速率，流体加热雾化实验证明了理论分析的正确性。

5.2.2 流体温度对雾化颗粒的影响

为了探究温度与流管型雾化器雾化颗粒的关系，采用激光粒度分析仪对雾化颗粒进行测试，雾化颗粒测试实验装置图如图 5-6 所示。首先，将甘油混合物置于水浴加热锅中进行加热并保温五分钟。之后直流电源驱动蠕动泵，将加热处理后的流体泵送至流管型雾化器中，信号发生器输出交流信号经过功率放大器放大后作用于流管型雾化器上实现雾化，示波器实时监测作用于雾化器上的驱动频率和驱动电压。最后，雾化生成的雾滴喷入激光粒度分析仪的雾化颗粒入口中进行测试。实验中使用动力粘度为 100 cP 的甘油混合物在温度为 25 ℃、30 ℃、35 ℃和 40 ℃下进行测试，共测量了 4 组不同温度下流管型雾化器的雾化颗粒直径。其中设置流管型雾化器交流信号的驱动电压为 76 V，驱动频率为 507 kHz。

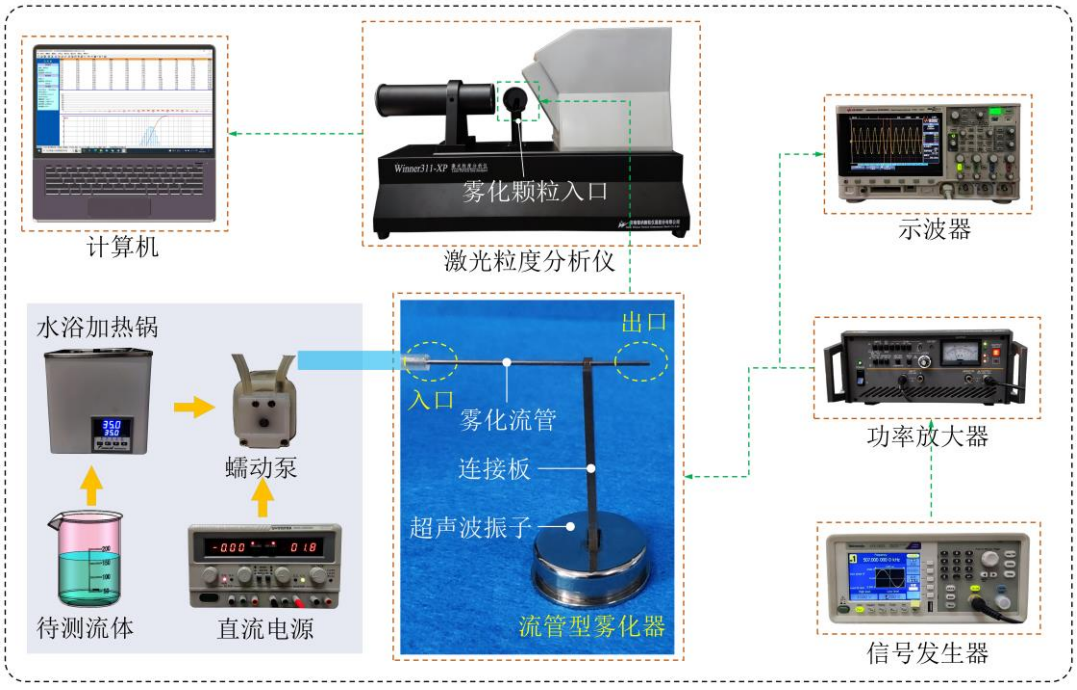


图 5-6 雾化颗粒测试实验装置图

Fig. 5-6 Diagram of the experimental setup for atomization particle measurement

中国知网 https://www.cnki.net

待测流体经过不同温度加热处理后的雾化颗粒测试实验结果如图 5-7 所示。其中，动力粘度为 100 cP 的甘油混合物，在雾化温度为 25 ℃、30 ℃、35 ℃和 40 ℃时的雾化颗粒均呈现正态分布。雾化颗粒的平均直径分别为 13.742 μm、12.879 μm、13.338 μm 和 12.135 μm。此外，90%的雾化颗粒尺寸分别小于 25.558 μm、21.154 μm、23.020 μm 和 19.893 μm。50%的雾化颗粒分别小于 12.295 μm、12.344 μm、12.500 μm 以及 11.640 μm。10%的雾化颗粒尺寸分别小于 3.914 μm、5.315 μm、4.813 μm 和 5.033 μm。实验结果表明，在雾化温度为 25 ℃-40 ℃时，流管型雾化器的雾化颗粒平均直径在 12 μm 至 14 μm 的范围内波动。并且，随着流体温度的升高，流管型雾化器的雾化颗粒直径无明显变化趋势，这也说明在雾化温度为 25 ℃-40 ℃时，流体温度的变化对流管型雾化器的雾化颗粒直径影响较小。

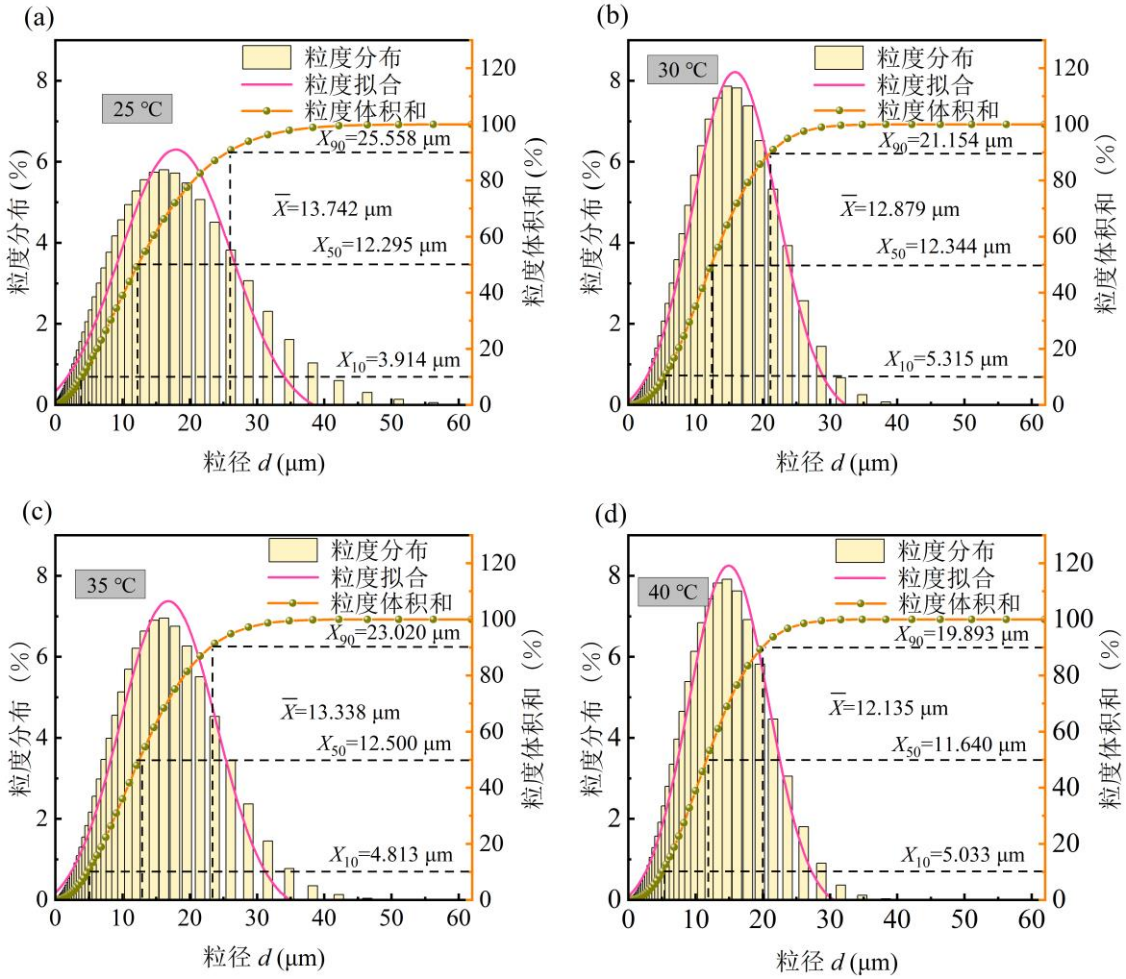


图 5-7 流体加热后雾化颗粒测试实验结果：（a）25 ℃;（b）30 ℃;（c）35 ℃; 40 ℃

Fig. 5-7 Experimental results of atomized particle measurement after liquid heating: (a) 25 ℃; (b) 30 ℃; (c) 35 ℃; (d) 40 ℃

中国知网 https://www.cnki.net

5.2.3 流体温度对雾化前后拉曼光谱的影响

为了探究不同温度加热处理后流体的化学性质是否发生变化，以及经过不同温度加热处理后，流管型雾化器雾化产物的化学性质变化。本研究选择显微共聚焦拉曼光谱仪作为流体拉曼光谱分析实验装置，实验装置如图 5-8 所示。其中，光谱仪激光器的光源波长为 532 nm，测试流体为动力粘度为 100 cP 的甘油混合物。实验时分别将甘油混合物加热至 30 ℃、35 ℃、40 ℃和 45 ℃。之后将经过水浴加热锅加热并保温处理 5 分钟的甘油混合物滴入到载玻片上放入显微共焦拉曼光谱仪镜头正下方，观察加热后流体的化学性质。最后再对经过水浴加热锅加热保温处理后的甘油混合物泵送到流管型雾化器中进行雾化实验，同时收集雾化后的产物进行拉曼光谱分析，分析经过流管型雾化器雾化后流体的化学性质。

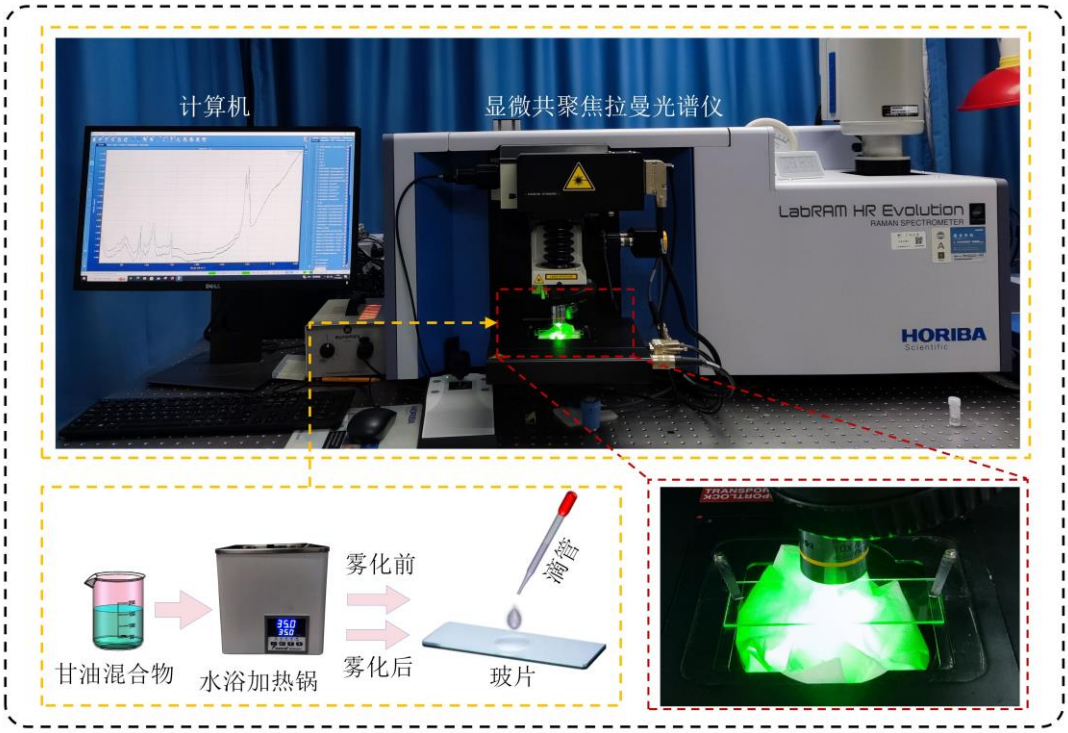


图 5-8 流体加热雾化拉曼光谱实验装置

Fig. 5-8 Experimental setup for liquid-heated atomized Raman spectroscopy

流体雾化前和雾化后的拉曼光谱分析如图 5-9 所示。其中，拉曼峰的位置表示官能团的种类，拉曼峰的高度表示该官能团的浓度。流体在不同温度下未经过流管型雾化器雾化前的拉曼光谱如图 5-9（a）所示，雾化前每个温度的拉曼峰位置均在同一个位置，而拉曼峰在强度上有稍微的变化。这说明在流体温度为 30 ℃-45 ℃时，流体的化学性质没有发生改变，而是官能团的浓度发生了变化，这是由于加热引起流体中的水分子蒸发，

中国知网 https://www.cnki.net

导致官能团的浓度发生变化导致的结果。

流体在不同温度下经过流管型雾化器雾化后的拉曼光谱如图 5-9（b）所示，与雾化前的拉曼分析结果类似，经过流管型雾化器雾化后每个温度拉曼峰位置均在同一个位置，仅在拉曼峰的强度上存在差异。这也说明在流体温度为 30 ℃-45 ℃时，流体经过流管型雾化器雾化后的化学性质没有发生改变，仅是官能团的浓度发生了变化。这是由于加热引起流体中的水分子蒸发和雾化过程中少量雾滴飘散在空气中融入了杂质而导致官能团的浓度发生变化而引起的结果。流体加热雾化拉曼光谱分析实验证明了流体在常温至 45 ℃时，流体雾化前的化学性质不会因为温度的变化而改变。并且经过流管型雾化器雾化后的化学性质能够保持在流体被加热雾化前的性质。同时拉曼光谱分析实验也证明了流管型雾化器在最佳雾化温度 40 ℃时雾化产物的安全性。并且流管型雾化器的最佳雾化温度（40 ℃）与生命体体温相近，药物进入人体后能够与人体环境相适应，有效地提高药物的利用度，有利于药物的吸收。因此流管型雾化器在生物医疗领域具有巨大的应用前景。

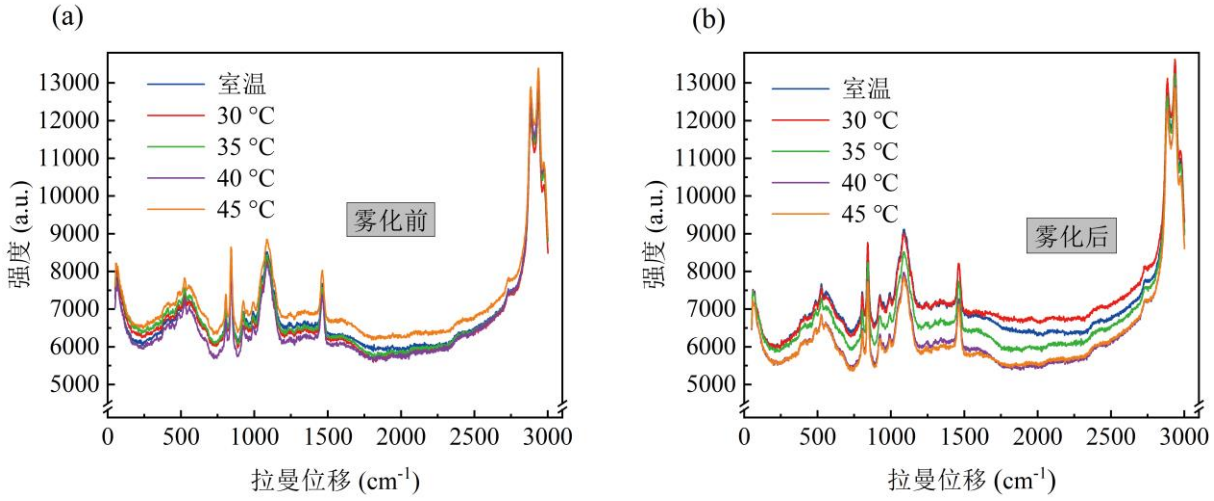


图 5-9 流体加热雾化拉曼光谱分析结果：（a）雾化前；（b）雾化后

Fig. 5-9 Results of liquid-heated atomization Raman analysis: (a) Before atomization; (b) After atomization

5.3 流体搅拌速率对雾化性能的影响

流体在搅拌的过程中，转子旋转的剪切力将流体分散成众多尺寸不同的液体团，液体团在涡旋的作用下增加了与空气接触的机会，使得流体与空气总接触面积增大，从而让流体溶入的气泡增多。在分析流体搅拌速率与流管型雾化器的雾化性能关系之前，需要分析流体搅拌速率与流体含气量的关系。

中国知网 https://www.cnki.net

本研究利用超景深显微镜对搅拌后的流体进行观测，对比不同搅拌速率下气泡数量的变化，超景深显微镜气泡观测装置如图 5-10 所示。首先利用磁力搅拌器将动力粘度为 50 cP 的甘油混合物分别搅拌五分钟，并且以搅拌速率为自变量分为 4 组，分别为 0 r/min、500 r/min、1000 r/min 和 1500 r/min。之后将搅拌后的甘油混合物放置于载玻片槽内上，并且利用超景深显微镜对不同搅拌速率下甘油混合物内部的气泡密度进行观测。由于流体中的气泡直径大约为 3 μm。因此，需要将超景深显微镜倍数调至 2500 倍，之后微调超景深显微镜镜头，使视野清晰。在调节超景深显微镜的镜头过程中，由于流体处于高速流动的状态而导致对焦困难，为了便于观测流体内部气泡密度，所以在流体与载玻片凹槽接触的边界处进行对焦。对焦之后对超景深显微镜观测结果进行拍照，记录可视范围内的气泡密度。

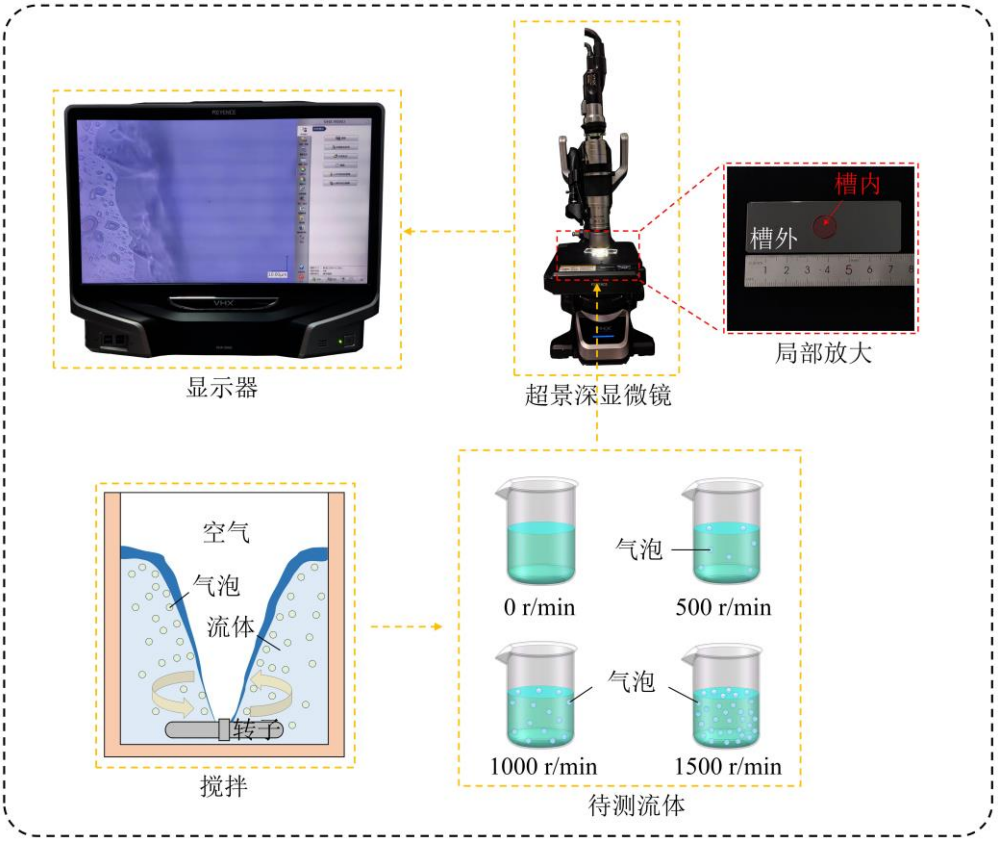


图 5-10 超景深显微镜气泡观测装置图

Fig. 5-10 Diagram of the optical super depth-of-field microscope bubble observation device

如图 5-11 所示为不同搅拌速率条件下甘油混合物的气泡密度，图中分别展示了四组不同搅拌速率条件下的气泡密度分布。如图 5-11（a）所示，当搅拌速率为 0 r/min 时，可视范围内几乎不存在气泡。如图 5-11（d）所示，当搅拌速率为 1500 r/min 时，相比其余三种经过不同搅拌速率处理后的甘油混合物，可视范围内气泡数量增加。如图 5-11（b）

中国知网 https://www.cnki.net

和 5-11（c）所示，当搅拌速率分别为 500 r/min 和 1000 r/min 时，在可视范围内均存在气泡，并且随着搅拌速率的增加，气泡密度增大。因此，通过观察图 5-11 中不同搅拌速率下甘油混合物的气泡密度，可以证明甘油混合物中的气泡密度随着搅拌速率的增加而增加，所以在后续的实验中可以通过提高搅拌速率来增加流体的含气量，进而分析流体搅拌速率变化对雾化性能的影响。

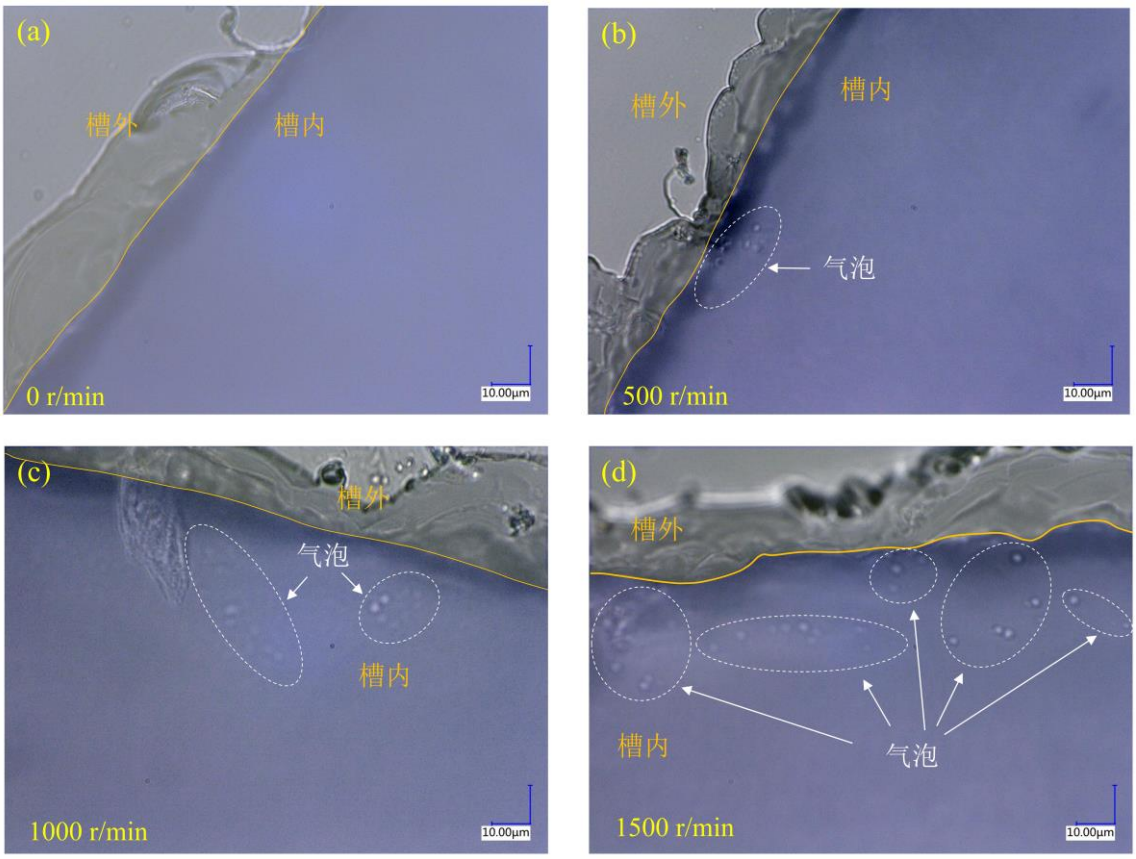


图 5-11 不同搅拌速率下甘油混合物的气泡密度：（a）0 r/min;（b）500 r/min;（c）1000 r/min;（d）1500 r/min

Fig. 5-11 The bubble density of glycerol mixtures at different stirring rates: (a) 0 r/min; (b) 500 r/min; (c) 1000 r/min; (a) 1500 r/min

5.3.1 流体搅拌速率对雾化速率的影响

为了探究流体在不同搅拌速率下对流管型雾化器雾化速率的影响。利用磁力搅拌器分别对动力粘度为 50 cP、100 cP、150 cP 和 200 cP 的甘油混合物搅拌 5 分钟，之后将搅拌处理后的流体进行雾化实验。搅拌雾化实验装置如图 5-12 所示，搅拌雾化的实验设计与加热雾化实验相似，分别采用动力粘度为 50 cP、100 cP、150 cP 和 200 cP 的甘油混合物进行搅拌，然后将 4 种粘度的甘油混合物根据不同搅拌速率共分为 4 组，分别为

中国知网 https://www.cnki.net

0 r/min、500 r/min、1000 r/min 和 1500 r/min。其中以搅拌速率 0 r/min 作为对照组。利用直流电源驱动蠕动泵，将搅拌处理后的甘油混合物泵送至流管型雾化器内。之后打开信号发生器输出交流信号，功率放大器将交流信号放大作用于流管型雾化器而实现雾化，示波器则被用于实时监测交流信号波形、驱动电压和驱动频率。同时，将交流信号驱动频率设置为 507 kHz，交流信号的驱动电压从 70 V 依次调节到 80 V，以 2 V 为间距共完成 6 组雾化速率的测量实验。针对不同粘度的流体，分别在不同搅拌速率下进行雾化实验，最后记录雾化速率。

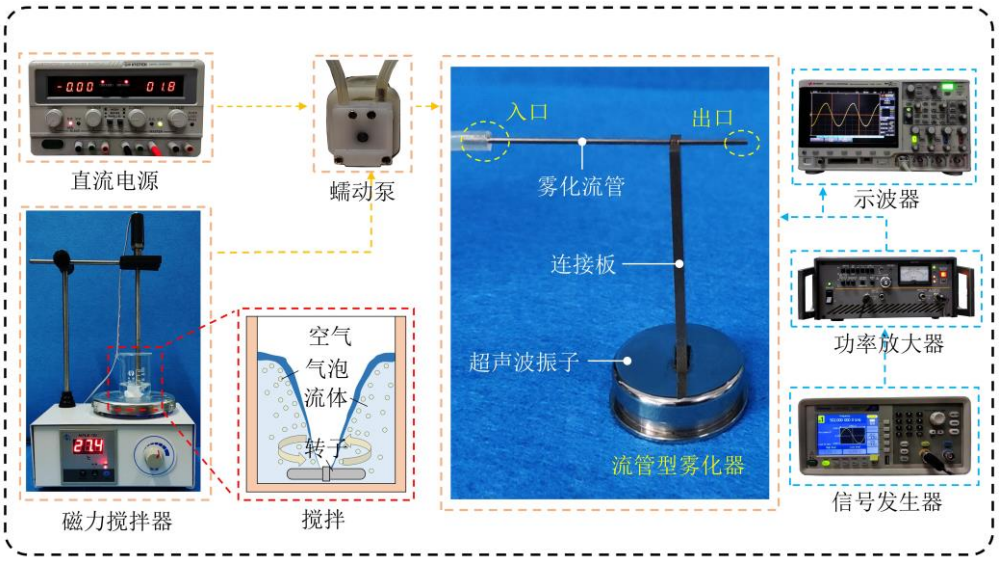


图 5-12 搅拌雾化实验装置

Fig. 5-12 Experimental setup for stirring atomization

图 5-13 为不同搅拌速率下流管型雾化器的雾化速率随驱动电压变化的关系图。其中，图 5-13（a）至 5-13（d）分别为 4 种不同粘度的甘油混合物，在不同搅拌速率下雾化速率的变化趋势。实验结果显示，对于相同粘度的流体，在相同交流信号驱动电压下，随着搅拌速率的升高，流管型雾化器的雾化速率也随之增加。其中在动力粘度为 50 cP，搅拌速率为 500 r/min 时，最大雾化速率为 77.2 mg/min。当流体搅拌速率为 1500 r/min 时最大雾化速率为 105 mg/min。流体搅拌速率从 500 r/min 到 1500 r/min 时，流管型雾化器的雾化速率提高 36.01%。这是因为增加搅拌速率导致流体融入气泡的数量增加，引起流体内空化阈值和空化核瞬时崩溃压力降低，而空化阈值降低的影响大于空化核瞬时崩溃压力降低的影响，因此导致空化强度升高，雾化速率提高。测试流体的搅拌速率从 500 r/min 至 1500 r/min 时，流管型雾化器的雾化速率随着搅拌速率的提高而升高。然而搅拌速率的提高引起空化阈值和空化核瞬时崩溃压力的降低，并且空化阈值降低的影响

中国知网 https://www.cnki.net

大于空化核瞬时崩溃压力降低的影响，因此导致空化强度升高，雾化速率提高。对于粘度和搅拌速率相同的流体，流管型雾化器的雾化速率随着交流信号的驱动电压增加而增加，这是因为驱动电压增加而导致雾化流管的振动幅值的增大，从而提高空化强度，实现更高的雾化速率。流体搅拌雾化实验证明，通过增加流体含气量来提高空化强度可以有效地提高流管型雾化器的雾化速率。

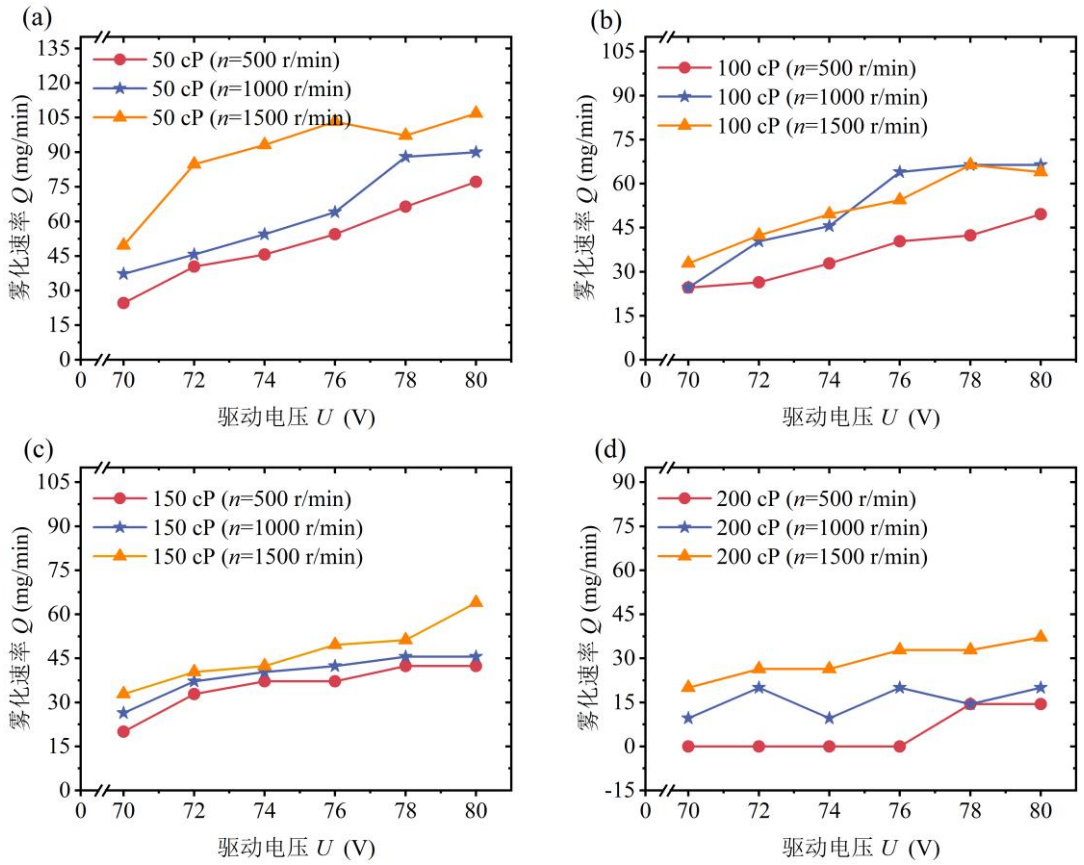


图 5-13 不同搅拌速率下雾化速率随驱动电压的变化：（a）50 cP 甘油混合物；（b）100 cP 甘油混合物；（c）150 cP 甘油混合物；（d）200 cP 甘油混合物

Fig. 5-13 Variation of atomization rate with driving voltage for different stirring rates: (a) 50 cP glycerin mixture; (b) 100 cP glycerin mixture; (c) 150 cP glycerin mixture; (d) 200 cP glycerin mixture

5.3.2 流体搅拌速率对雾化颗粒的影响

为了探究搅拌速率与流管型雾化器雾化颗粒的关系，利用与加热处理时测试雾化颗粒直径的方法类似，采用激光粒度分析仪对雾化颗粒进行测试。首先，将甘油混合物置于磁力搅拌器中进行搅拌五分钟。之后直流电源驱动蠕动泵，将搅拌处理后的流体泵送至流管型雾化器中，信号发生器输出交流信号经过功率放大器放大后，作用于流管型雾

中国知网 https://www.cnki.net

化器上实现雾化。示波器实时监测作用于流管型雾化器上驱动频率和驱动电压的变化。最后，雾化生成的雾滴喷入激光粒度分析仪的雾化颗粒入口中进行测试。实验中使用动力粘度为 100 cP 的甘油混合物在搅拌速率为 0 r/min、500 r/min、1000 r/min 和 1500 r/min 下进行实验，共测量了 4 组不同搅拌速率下的雾化颗粒直径。其中设置流管型雾化器交流信号的驱动电压为 76 V，驱动频率为 507 kHz。

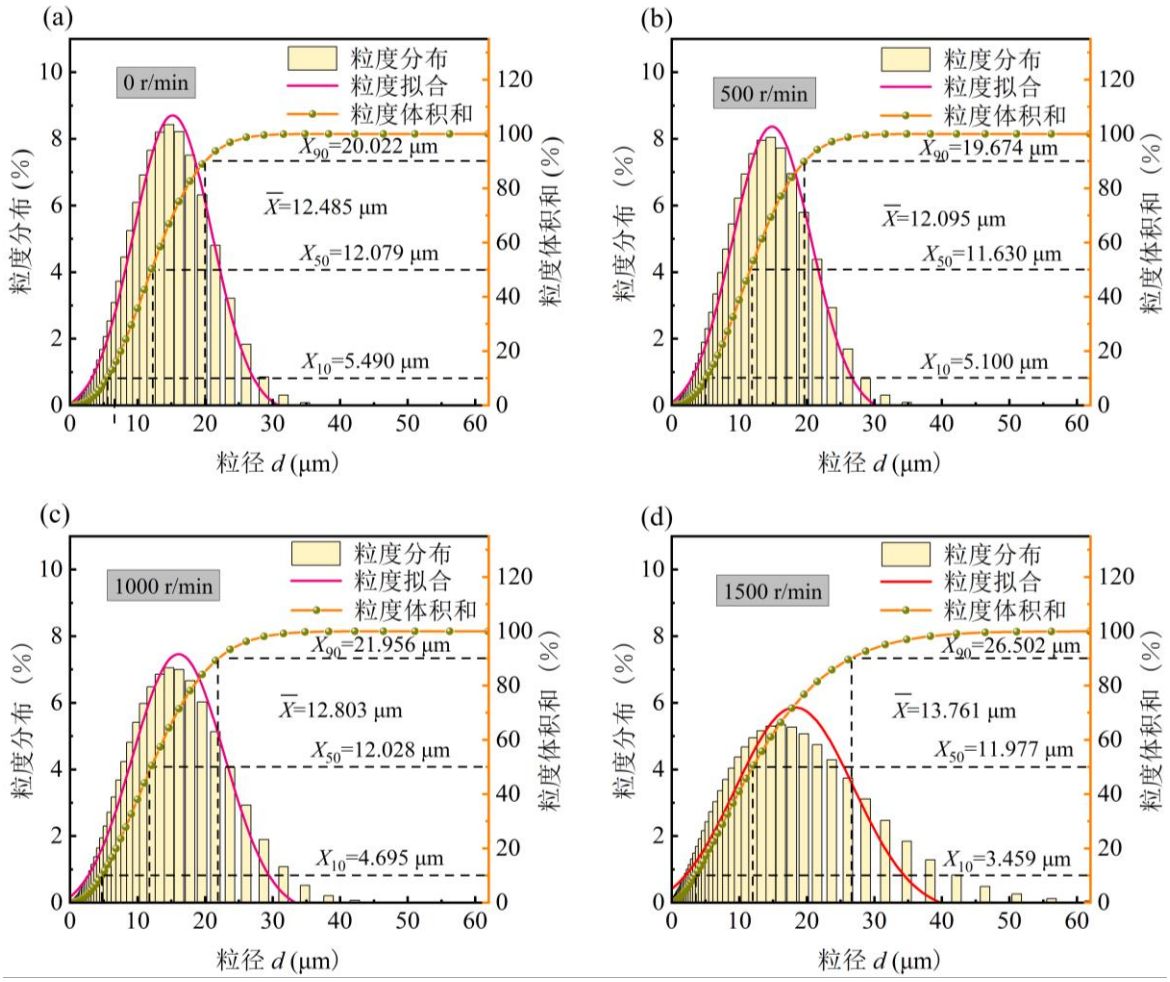


图 5-14 流体搅拌后雾化颗粒结果：（a）0 r/min;（b）500 r/min;（c）1000 r/min; （d）1500 r/min

Fig. 5-14 Results of atomized particles after liquid stirring: (a) 0 r/min; (b) 500 r/min; (c) 1000 r/min; (d) 1500 r/min;

流体搅拌处理后流管型雾化器的雾化颗粒测试实验结果如图 5-14 所示，动力粘度为 100 cP 的甘油混合物分别搅拌速率为 0 r/min、500 r/min、1000 r/min 以及 1500 r/min 时的雾化颗粒均正态分布，雾化颗粒平均直径分别为 12.485 μm、12.095 μm、12.803 μm 以及 13.761 μm。并且，90%的颗粒尺寸分别小于 20.022 μm、19.674 μm、21.956 μm 和 26.502 μm。50%的颗粒尺寸分别小于 12.079 μm、11.630 μm、12.028 μm 和 11.977 μm。10%的雾化颗粒尺寸分别小于 5.490 μm、5.100 μm、4.695 μm 和 3.459 μm。从实验结果

中国知网 https://www.cnki.net

可以得到，在搅拌速率 1500 r/min 以下，流管型雾化器的雾化颗粒平均直径在 12 μm 至 14 μm 的范围内波动。随着搅拌速率的升高，流管型雾化器的雾化颗粒直径无明显变化趋势，这说明在搅拌速率 1500 r/min 以下，搅拌速率的变化对流管型雾化器的雾化颗粒直径影响较小。

5.3.3 流体搅拌速率对雾化前后拉曼光谱的影响

为了验证搅拌处理后流体的化学性质，以及经过搅拌处理后流管型雾化器的雾化产物的安全性。本实验选择与加热拉曼光谱分析实验相同的实验装置，即显微共焦拉曼光谱仪作为实验测试装置。其中激光器光源波长为 532 nm。实验测试流体选择动力粘度为 100 cP 的甘油混合物，并且利用磁力搅拌器分别以转速为 0 r/min、500 r/min、1000 r/min 和 1500 r/min 搅拌 5 分钟，随后将经过搅拌处理后的甘油混合物滴入到载玻片上放入光谱仪镜头正下方，观察搅拌后流体的化学性质。其次再对经过搅拌处理后的甘油混合物输送到流管型雾化器中进行雾化实验，同时收集雾化后的产物进行拉曼光谱分析，分析经过流管型雾化器雾化后流体的化学性质。

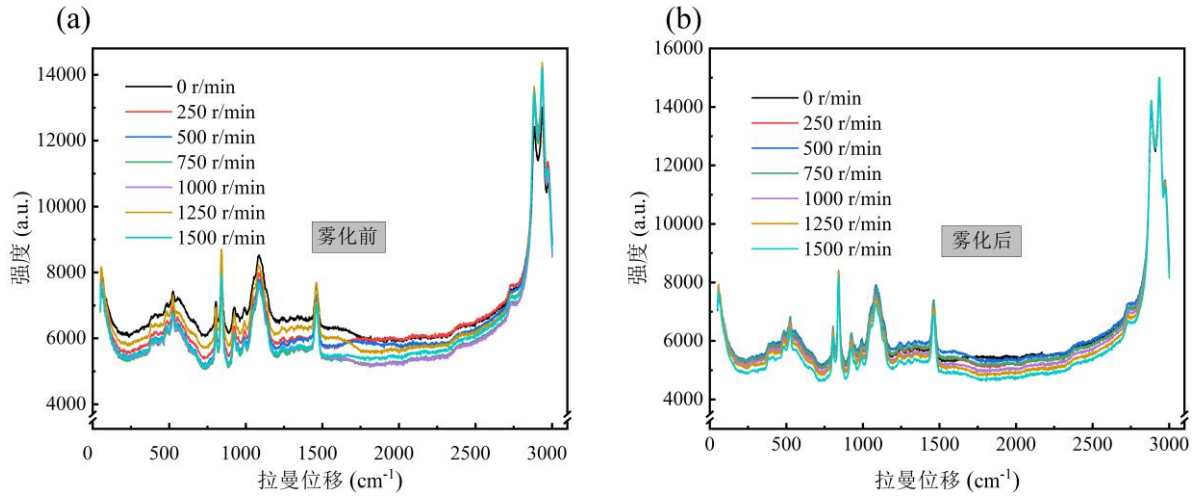


图 5-15 流体搅拌雾化拉曼分析：（a）雾化前；（b）雾化后

Fig. 5-15 Raman analysis for liquid stirring atomization: (a) Before atomization; (b) After atomization

待测流体搅拌处理后雾化前和雾化后的拉曼分析结果如图 5-15 所示。其中，搅拌速率为 0 r/min、250 r/min 、500 r/min、750 r/min、1000 r/min、1250 r/min 和 1500 r/min。其中，拉曼峰的位置表示官能团的种类，拉曼峰的高度表示该官能团的浓度。流体在不同搅拌速率下未经过流管型雾化器雾化前的拉曼光谱如图 5-15（a）所示，雾化前流体在不同搅拌速率下拉曼峰的位置均在同一个位置上。而在不同搅拌速率下拉曼峰强度不同。这说明流体在 0 r/min-1500 r/min 的搅拌速率范围内，流体的化学性质并没有发生改

中国知网 https://www.cnki.net

变，而是官能团的浓度发生了变化，这是因为在搅拌过程中融入杂质而引起官能团浓度变化的结果。

流体在不同搅拌速率下，经过流管型雾化器雾化后的拉曼光谱如图 5-15（b）所示。雾化后的拉曼光谱与雾化前类似，经过流管型雾化器雾化后，不同搅拌速率下拉曼峰的位置均在同一个位置上，仅在拉曼峰的强度上存在差异。这说明在 0 r/min-1500 r/min 搅拌速率范围内，流体经过流管型雾化器雾化后的化学性质没有发生改变，仅是官能团的浓度发生了变化，而官能团的浓度的变化是因为在雾化过程中，少量雾滴飘散在空气中融入了杂质的结果。流体搅拌雾化拉曼光谱分析实验证明，流体在 0 r/min-1500 r/min 搅拌速率范围内，流体雾化前的化学性质不会因为搅拌速率的变化而改变，且经过流管型雾化器雾化后的流体能够保持在未搅拌雾化前的性质，进一步证明了流管型雾化器的稳定性。

5.4 本章小结

本章在流管型雾化器结构参数和驱动参数均一定的前提下，通过对流体进行加热和搅拌两种处理来影响空化性能，进而分析上述处理对雾化性能的影响，判断空化强度对雾化性能的作用。通过加热和搅拌流体，进行流管型雾化器的雾化速率分析、雾化颗粒度分析以及拉曼光谱分析：

（1）分析了流体温度对雾化性能的影响。其中加热雾化速率实验结果显示，在流体温度 25 ℃-45 ℃范围内，流管型雾化器的雾化速率随着温度的增加而增加，证明通过增加流体含温度来提高空化强度可以有效地提高流管型雾化器的雾化速率。并且，流体动力粘度为 50 cP，温度从 25 ℃加热到 40 ℃时，流管型雾化器的雾化速率提高了 61.7%。流体加热处理后，经过流管型雾化器雾化后粘度提高至 200 cP。雾化颗粒度实验证明雾化温度在 25 ℃-40 ℃范围内，温度的变化不会对流管型雾化器的雾化颗粒直径造成影响，并且雾化后的颗粒平均直径在 12 μm 至 14 μm 的范围内波动。拉曼光谱实验证明在常温至 45 ℃时，流体雾化前的化学性质不会因为温度的变化而改变，并且经过流管型雾化器雾化后的流体化学成分能够保持在雾化前的性质。

（2）分析了流体搅拌速率对雾化性能的影响，提高流体搅拌速率可以有效地增加流体含气量。流体搅拌雾化速率实验显示在 500 r/min-1500 r/min 的搅拌速率内，随着搅拌速率的提高，雾化速率增加，证明通过增加流体含气量来提高空化强度能够有效提高雾化速率。并且，流体搅拌速率从 500 r/min 到 1500 r/min 时，流管型雾化器的雾化速率

中国知网 https://www.cnki.net

提高 36.01%。流体搅拌处理后，经过流管型雾化器雾化后粘度提高至 200 cP。雾化颗粒度实验证明流体在 0 r/min-1500 r/min 搅拌速率内，经过流管型雾化器雾化后的颗粒平均直径在 12 μm 至 14 μm 的范围内波动。拉曼光谱实验证明流体在 0 r/min-1500 r/min 搅拌速率范围内，流体雾化前的化学性质不会因为温度的变化而改变，并且经过流管型雾化器雾化后的化学性质能够保持在雾化前的性质。

中国知网 https://www.cnki.net

第六章 总结及展望

6.1 本文工作总结

本文综述了现有超声雾化器的发展现状，概述了高粘度流体超声雾化的国内外发展现状及其应用。分析了声表面波雾化器、静态网孔雾化器和动态网孔雾化器的优点和缺点后，总结了现有超声雾化器高粘度流体雾化的局限性。针对这一局限性，基于空化效应的原理，研制流管型雾化器，并分析了流管型雾化器的结构特征。进行了高粘度流体在流管型雾化器内的受力特性分析和空化理论阐述。结合理论分析、有限元仿真和实验验证，探究流管型雾化器的高粘度流体雾化性能，验证流管型雾化器在雾化过程中的空化效应，同时分析了空化参数对流管雾化器雾化高粘度流体时的性能影响，进一步探究空化效应和雾化性能的关系。

（1）介绍流管型雾化器的整体结构和各组成部分，其雾化流管的横截面积较小但没有到达微米级别，可以有效地避免声表面波雾化和网孔雾化的影响。从空化效应的角度分析了流管型雾化器的工作原理，然后结合雾化流管的振动特性和牛顿第二定律推导出空化核在位移稳态响应下的受力，简化了空化阈值公式并与流体粘度建立联系。根据能量守恒定律，结合位移稳态响应下空化核受力推导出空化核瞬时崩溃压力。

（2）基于理论分析的位移稳态响应下空化核受力，进行空化核溃灭仿真，分析空化核溃灭时释放的瞬时崩溃压力。空化核崩溃时流体所受力最大值与初始值压力差近 73.1 倍，高粘度流体在强大瞬时崩溃压力下实现雾化，验证了理论分析的正确性。搭建流管型雾化器的实验平台，进行流管型雾化器在常温下的阻抗分析实验和雾化速率实验。实验结果表明，当驱动电压和驱动频率一定时，测试流体粘度越高，雾化速率越低，流管型雾化器常温下最大雾化粘度为 175 cP，超过目前常温下超声雾化粘度记录的 5.5 倍。证明流管型雾化器具有高粘度流体雾化的性能。

（3）根据超声空化效应使流体发生乳浊化而导致吸光度增加的原理，通过全光谱分析实验得出雾化流管内的雾化前光强、雾化前吸光度和雾化后吸光度。之后结合吸光度理论计算出雾化后光强，结果表明，雾化后光强与雾化前的光强对比减少近 20 倍，证明流管型雾化器雾化过程发生空化效应，使流体吸光度增加，接收端光强降低。同时完成雾化流管的空化雾化观测，结果显示雾化流管端面截面流体呈椭圆形状，靠近管壁的高粘度流体优先被雾化，说明流体靠近管壁处的空化效应更剧烈，验证理论分析的正

中国知网 https://www.cnki.net

确性。分析流体雾化前后的拉曼光谱，结果证明，雾化前后流体拉曼峰的位置未发生改变，流管型雾化器高频振动时产生剧烈的声波和热效应，未对流体成分和活性造成影响。

（4）通过对甘油混合物进行加热和搅拌两种处理来影响空化性能，进而分析上述处理对流管型雾化器雾化速率的影响。其中，加热雾化速率实验结果显示，随着雾化温度的升高，雾化速率呈现出上升的趋势。在雾化温度为 25 ℃-40 ℃时，通过升高温度来提高空化强度能够有效地提高雾化速率。并且，流体温度从 25 ℃加热到 40 ℃时，50 cP 的流体雾化速率提高 61.7%。流体搅拌雾化速率的实验显示，在搅拌速率 1500 r/min 以下，随着搅拌速率的升高，雾化速率增加，说明通过增加流体含气量来提高空化强度可以有效地提高雾化速率。并且，流体搅拌速率为 500 r/min-1500 r/min 时，50 cP 的流体雾化速率提高 36.01%。流体加热和搅拌处理后，经过流管型雾化器雾化后的动力粘度提高至 200 cP。

（5）进行了甘油混合物加热和搅拌后雾化颗粒和拉曼光谱分析测试。对于雾化颗粒：流管型雾化器雾化后的颗粒平均直径在 12 μm 至 14 μm 的范围内波动。对于拉曼分析：雾化前后拉曼峰的位置均未发生改变，说明经过流管型雾化器雾化后甘油混合物的化学性质能够保持在未加热和搅拌前的性质，证明流管型雾化器的雾化稳定性。以上结论为高粘度流体的超声雾化提供了新的科学参考。

6.2 本文创新点

本论文创新点主要体现在以下方面：

（1）基于流管型雾化器的结构参数和高粘度流体性质，分析推导得到高粘度流体的空化阈值、空化核瞬时崩溃压力以及空化核在稳态响应下受到的外力，并且通过仿真和实验验证了理论推导的正确性。

（2）通过实验验证流管型雾化器在常温下，能够实现动力粘度高达 175 cP 流体的有效雾化，超出目前超声雾化粘度记录的 5.5 倍，解决了高粘度流体超声雾化的难题。

（3）证明流管型雾化器在雾化过程中发生了空化效应。

（4）对流体加热和搅拌处理来提高空化强度，能够有效提高雾化速率和雾化粘度。

（5）流管型雾化器的超声雾化是一种不会破坏流体原有化学性质的物理变化，能够适用于生命体的吸入式治疗。

（6）流管型雾化器的雾化颗粒直径在 12 μm-14 μm 的范围内波动。

中国知网 https://www.cnki.net

6.3 研究展望

本文基于流管型雾化器的结构，在对其高粘度流体雾化性能研究的同时，进行了雾化过程中空化效应的验证，并且探究了空化参数对雾化性能的影响。但是由于各方面因素的限制，本文研究中仍然存在着许多不足的地方，后期可从以下方面进行研究和完善：

（1）本研究的流管型雾化器由于雾化流管内径较小，从而限制其单位时间通过的流体体积，进而导致雾化量较少。因此在后续的研究中可以在连接板上焊接多根雾化流管同时雾化，提高雾化量。

（2）本研究已经通过对流体进行加热和搅拌处理改变空化参数，进而影响雾化性能。在后续的研究中，可以通过改变流管型雾化器的结构，找到能够提高空化强度的最佳结构参数，进一步提高雾化性能。

（3）本研究的流管型雾化器的平均雾化颗粒直径约为 12 μm，该颗粒尺寸能够满足大多数领域的应用，但是还不能满足人体吸入式疫苗靶向给药的标准。因此，在后续的研究中，可以通过减小雾化流管的内径而减小雾化颗粒直径。

（4）本研究的流管型雾化器虽然能够解决吸入式治疗中高粘度药液雾化的难题，并且在雾化前后流体的化学性质未发生变化。但是在流管型雾化器应用于生物医疗领域之前，还需要对具体药液雾化后的成分进行物性分析，以保证安全性。

中国知网 https://www.cnki.net

参考文献

[1] Wu X, Yu Y H, Wang M Y, et al. AAV-delivered muscone-induced transgene system for treating chronic diseases in mice via inhalation[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 1122.

[2] Hua L, Jiang Y, Li H, et al. Effects of different nozzle orifice shapes on water droplet characteristics for sprinkler irrigation[J]. Horticulturae, 2022, 8(6): 538.

[3] Xu W, Li C H, Zhang Y B, et al. Electrostatic atomization minimum quantity lubrication machining: from mechanism to application[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2022, 4(4): 042003.

[4] Tseng H Y, Lin H L, Chiang H S. In vitro evaluation of aerosol delivery by hand-held mesh nebulizers in an adult spontaneous breathing lung model[J]. Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery, 2022, 35(2): 83-90.

[5] 王烁鑫, 李海英, 张军亚, 等. 基于化学润湿作用的雾化除尘实验研究[J]. 过程工程学报, 2024, 24(01): 97-106.

[6] 杨湘荣. 面漆喷涂雾化器测试平台研发[J]. 现代涂料与涂装, 2021, 24(12): 37-39.

[7] 肖帅, 李浩, 李发琪, 等. 聚焦超声在整形美容中的应用及关键问题研究进展[J]. 中国医疗美容, 2022, 12(03): 74-78.

[8] Gharaghani A, Javarzari A M, Rezaei A, et al. Kaolin Spray Improves Growth, Physiological Functions, Yield, and Nut Quality of ‘Tardy Nonpareil’Almond under Deficit Irrigation Regimens[J]. Erwerbs-Obstbau, 2023, 65(4): 989-1001.

[9] Arachchilage K H, Haghshenas M, Park S, et al. Numerical simulation of high-pressure gas atomization of two-phase flow: Effect of gas pressure on droplet size distribution[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(11): 2726-2732.

[10] Jia J X, Zhao L X, Liu Z D, et al. Spray atomization characteristics of biomass pyrolysis tar: Influence of methanol addition, temperature, and atomization pressure[J]. Energy, 2022, 242: 122534.

[11] Zhang Y, Yuan S M, Gao Y. Spatial distribution and transient evolution of sub-droplet velocity and size in ultrasonic atomization[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2023, 140: 110761.

中国知网 https://www.cnki.net

[12] Park S, Park K. Principles and droplet size distributions of various spraying methods: A review[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(8): 4033-4041.

[13] Zhang H, Wu Y Q, Wan X C, et al. Effect of Hypochlorous Acid on Blepharitis through Ultrasonic Atomization: A Randomized Clinical Trial[J]. Journal of Clinical Medicine, 2023, 12(3): 1164.

[14] Naidu H, Kahraman O, Feng H. Novel applications of ultrasonic atomization in the manufacturing of fine chemicals, pharmaceuticals, and medical devices[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 105984.

[15] Zhao Q, Xie M, Liu Y C, et al. Improved electroless plating method through ultrasonic spray atomization for depositing silver nanoparticles on multi-walled carbon nanotubes[J]. Applied Surface Science, 2017, 409: 164-168.

[16] Han Z T, Zhao D S, Zheng D S, et al. NO removal from simulated flue gas with a $NaClO_2$ mist generated using the ultrasonic atomization method[J]. Energies, 2018, 11(5): 1043.

[17] Guttenberg Z, Rathgeber A, Keller S, et al. Flow profiling of a surface-acoustic-wave nanopump[J]. Physical Review E, 2004, 70(5): 056311.

[18] Avvaru B, Patil M N, Gogate P R, et al. Ultrasonic atomization: effect of liquid phase properties[J]. Ultrasonics, 2006, 44(2): 146-158.

[19] Zhang J H, Yan Q F, Sun W T. Advances in Piezoelectric Atomizers[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 37(01): 54-69.

[20] Kurosawa M, Watanabe T, Futami A, et al. Surface acoustic wave atomizer[J]. Sensors and Actuators-A-Physical Sensors, 1995, 50(1): 69-74.

[21] Yamagata Y. Surface acoustic wave atomizer and electrostatic deposition[J]. Nano/Micro Biotechnology, 2010: 101-114.

[22] Huang Q Y, Le Y, Hu H, et al. Experimental research on surface acoustic wave microfluidic atomization for drug delivery[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 7930.

[23] De Heij B, Van Der Schoot B, Bo H, et al. Characterisation of a fL droplet generator for inhalation drug therapy[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 85(1-3): 430-434.

[24] 王国辉, 周兆英, 袁松梅, 等. 压电驱动微喷雾粒特性的理论和实验分析[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(5): 6-8.

[25] Vecellio L. The mesh nebuliser: a recent technical innovation for aerosol delivery[J].

中国知网 https://www.cnki.net

Breathe, 2006, 2(3): 252-260.

[26] 朱寅, 陈云飞. 一种压电致动网孔式雾化器的设计[J]. 机械与电子, 2008 (2): 23-25.

[27] Yan Q F, Zhang J H, Huang J, et al. The effect of vibration characteristics on the atomization rate in a micro-tapered aperture atomizer[J]. Sensors, 2018, 18(4): 934.

[28] 张建辉, 胡方军, 纪晶. 压电陶瓷超声雾化片[P]. 中国：CN201110413234.5, 2011.

[29] 陈曦, 李浩莹. 一种新型振动网孔式雾化器的设计[J]. 机械与电子, 2013 (2): 3-7.

[30] Zhou H M, Shi L P, Tan J L, et al. The design of medical micro atomization device based on piezoelectric actuators[C]. 2nd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Materials Engineering (AEMCME), 2019.

[31] Jun M B G, Joshi S S, DeVor R E, et al. An experimental evaluation of an atomization-based cutting fluid application system for micromachining[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2008, 130(3): 031118.

[32] Qi A, Yeo L Y, Friend J R. Interfacial destabilization and atomization driven by surface acoustic waves[J]. Physics of Fluids, 2008, 20(7): 074103.

[33] Raman I, Syafiq M, Sa'Ude N, et al. Viscosity effect on piezoelectric actuated nozzle in generating micro droplet[J]. Advanced Materials Research, 2013, 626: 415-419.

[34] Yoshioka K, Kurashina Y, Ogawa A, et al. Effect of the area of a lithium niobate transducer on the efficiency of ultrasonic atomization driven by resonance vibration[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106019.

[35] Lefebure A, Shim D. Ultrasonic atomization of highly viscous biodegradable oils for MQL applications[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(12): 5503-5516.

[36] Sharma P, Vazquez I R, Jackson N. Atomization of High Viscous Liquids Using a MEMS Vibrating Mesh with Integrated Microheater[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2023, 32(4): 362-370.

[37] Bodier E, Mayor A, Vecellio L, et al. Designing inhaled protein therapeutics for topical lung delivery: what are the next steps[J]. Expert opinion on drug delivery, 2018, 15(8): 729-736.

[38] Almeida P C A, Smith K, Hearson G, et al. Comparing ultrasonic and breath-actuated jet nebulisers for sputum induction[J]. 2022, 60(66): 368

[39] Lu Q, Yang J X, Liu Z H, et al. Nebulized ceftazidime and amikacin in ventilator-

中国知网 https://www.cnki.net

associated pneumonia caused by Pseudomonas aeruginosa[J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2011, 184(1): 106-115.

[40] Xu L, Liu M Z, Yang Y Y, et al. Geraniol enhances inhibitory inputs to the paraventricular thalamic nucleus and induces sedation in mice[J]. Phytomedicine, 2022, 98: 153965.

[41] Barba A A, Amore M, Cascone S, et al. Intensification of biopolymeric microparticles production by ultrasonic assisted atomization[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009, 48(10): 1477-1483.

[42] Tsai C S, Mao R W, Lin S K, et al. Pocket-sized ultrasonic nebulizer for inhalation drug delivery[C]. 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). IEEE, 2013: 1190-1192.

[43] Alton E W F W, Armstrong D K, Ashby D, et al. Repeated nebulisation of non-viral CFTR gene therapy in patients with cystic fibrosis: a randomised, double-blind, placebo-controlled, phase 2b trial[J]. The Lancet Respiratory Medicine, 2015, 3(9): 684-691.

[44] Liu Z L, Jin M, Li Y, et al. Efficacy and safety of houttuynia eye drops atomization treatment for meibomian gland dysfunction-related dry eye disease: A randomized, double-blinded, placebo-controlled clinical trial[J]. Journal of Clinical Medicine, 2020, 9(12): 4022.

[45] Hussin M R M, Badaruddin S A M, Nor N M R M, et al. Ultrasonic atomization of graphene derivatives for heat spreader thin film deposition on silicon substrate[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 7: 763-769.

[46] Huang W T, Chou F I, Tsai J T, et al. Application of graphene nanofluid/ultrasonic atomization MQL system in micromilling and development of optimal predictive model for SKH-9 high-speed steel using fuzzy-logic-based multi-objective design[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2020, 22: 2101-2118.

[47] Angelis B, Migner A, Lucarini L, et al. The use of a non cultured autologous cell suspension to repair chronic ulcers[J]. International Wound Journal, 2015, 12(1): 32-39.

[48] Rajan R, Pandit A B. Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomisation[J]. Ultrasonics, 2001, 39(4): 235-255.

[49] Lang R J. Ultrasonic atomization of liquids[J]. The journal of the acoustical society of America, 1962, 34(1): 6-8.

中国知网 https://www.cnki.net

[50] Kooij S, Astefanei A, Corthals G L, et al. Size distributions of droplets produced by ultrasonic nebulizers[J]. Scientific reports, 2019, 9(1): 6128.

[51] Topp M N. Ultrasonic atomization-a photographic study of the mechanism of disintegration[J]. Journal of Aerosol Science, 1973, 4(1): 17-25.

[52] Avvaru B, Patil M N, Gogate P R, et al. Ultrasonic atomization: effect of liquid phase properties[J]. Ultrasonics, 2006, 44(2): 146-158.

[53] Galleguillos R. Acoustic cavitation detection during ultrasonic atomization process[J]. Applied Acoustics, 2022, 192: 108716.

[54] Sun X, You W B, Xuan X X, et al. Effect of the cavitation generation unit structure on the performance of an advanced hydrodynamic cavitation reactor for process intensifications[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 412: 128600.

[55] Xie T, Zeng Y H, Gui Z Z, et al. Piezoelectric atomization of liquids with dynamic viscosities up to 175 cP at room temperature[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 94: 106331.

[56] 卢伟中. 声空化物理[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 61-63.

[57] 冯若. 李化茂. 声化学及其应用[M]. 安徽:安徽科学技术出版社, 1992: 75-88.

[58] 王效贵, 罗冲, 顾桢标. 固壁面附近空化泡溃灭过程的数值模拟[J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(05): 512-516.

[59] 赵瑞, 梁忠诚, 徐荣青, 等. 固壁面附近空泡溃灭研究[J].南京邮电大学学报(自然科学版), 2009, 29(01): 83-86.

[60] Seeton C. J. Viscosity-temperature correlation for liquids[J]. In International joint tribology conference, 2006, 42592: 131-142

[61] Fulem M. Vapour pressure measurement of metal organic precursors used for MOVPE[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2006, 38(3): 312-322.

[62] Niemczewski B. Influence of concentration of substances used in ultrasonic cleaning in alkaline solutions on cavitation intensity[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2009, 16(3): 402-407.

[63] 王萍辉. 超声空化影响因素[J]. 河北理工学院学报, 2003, 25(4): 154-161.

中国知网 https://www.cnki.net