DOI：10.19789/j.1004-9398.2026.02.010　　**Open Access**
文献引用：徐奥，冯胜飞．纤端法布里-珀罗微腔仿生植物导管空化发声机制研究[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2026，47（2）：66-73. XU A，FENG S F. Mechanism of cavitation-acoustic emission in biomimetic plant vessels with fiber-tip Fabry-Pérot microcavities[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2026，47（2）：66-73.

纤端法布里-珀罗微腔仿生植物导管空化发声机制研究

徐　奥，冯胜飞*

（首都师范大学物理系，北京　100048）

摘要：含有木质部结构的植物在遭受到干旱或机械损伤胁迫时会出现发声现象，这一现象背后的物理机制引起研究者的广泛兴趣。当前，对这一现象最为认可的机制解释是植物木质部内部空化形成微气泡发生振动。然而，目前针对这一机制的解释仍然缺乏直接的证据。本文提出利用纤端法布里-珀罗（F-P）微腔仿生植物内部导管空化，从而研究其发声机制。采用飞秒激光双光子三维光刻技术在光纤端面上仿制内部为环形纹的导管结构，将其置于液体后，气液界面与光纤端面构成F-P腔，当气液界面发生振动时，F-P腔的腔长会发生变化，其共振峰也随之改变。实验观测到2种造成气液界面振动的机制：一是界面在导管内爬行时的跳跃；二是腔内凝结的水滴与界面的融合。研究表明这2种机制造成界面振动频率在20～100 kHz，该频段与文献中报道的植物发声频率范围一致。该项研究为理解植物内部发声的物理机制提供了间接证据。

关键词：光纤传感；3D双光子光刻技术；植物发声；导管空化振动；纤上法布里-珀罗微腔
中图分类号：O433　　**文献标志码**：A

Mechanism of cavitation-acoustic emission in biomimetic plant vessels with fiber-tip Fabry-Pérot microcavities

XU Ao，FENG Shengfei*

（Department of Physics，Capital Normal University，Beijing　100048）

Abstract：The acoustic emission phenomenon observed in plants with xylem structures under drought or mechanical stress has attracted significant research interest due to its underlying physical mechanisms. The most widely accepted hypothesis attributes this phenomenon to vibration caused by cavitation-induced microbubbles within xylem conduits. However，direct experimental evidence supporting this mechanism remains elusive. In this work，we propose a biomimetic approach to investigate cavitation-driven sound generation by replicating plant vessel cavitation using fiber-tip Fabry-Pérot（F-P）microcavities. A femtosecond laser two-photon 3D lithography technique was employed to fabricate annular microchannel structures mimicking plant vessels on optical fiber tips. When immersed in liquid，the gas-liquid interface and fiber end-face collectively form an F-P cavity. Vibrations of the gas-liquid interface induce detectable shifts in cavity length，manifested as resonance peak modulations. Two mechanisms causing gas-liquid interface vibration were observed in the

收稿日期：2025-04-25
*通信作者：fengshengfei@cnu.edu.cn

experiment: stick-slip jumping during interface propagation within microchannels, coalescence-induced oscillations between condensate droplets and the interface. Both mechanisms generated interface vibrations within the 20-100 kHz frequency range, consistent with acoustic emissions reported in plant studies. This work provides indirect but compelling evidence supporting the cavitation hypothesis of plant acoustic emissions.

Keywords: optical fibre sensing; 3D two-photon lithography; plant sounding; duct cavitation vibrations; fiber-end Fabry-Pérot microcavity

CLC: O433　　**DC**: A

0　引　言

植物在干旱、机械损伤等胁迫下的生理响应机制长期备受关注,在遭受胁迫时植物除了能发出可挥发性有机物、可改变颜色以及形态之外[1-3],植物还能发出可探测的声音[4]。通过对植物发声的探测,可以反推植物内部导管的物理信息。2023年,Dutta等[5]通过探测植物发出的超声波信号并对其进行解析,建立了振动模式与植物导管发声模型,揭示了植物在干旱胁迫下发出的超声波脉冲波形特征与木质部导管尺寸及黏弹性特性的直接关联;2023年,Khait等[6]研究表明,植物在干旱及受伤的情况下发出的声音中包含了重要的信息,这些信息包括植物的状况、脱水程度和受伤程度。其发声机制被认为是植物木质部空化,即干旱状态下水分不足,木质部导管内形成气泡,气泡破裂引发机械振动通过组织传导并辐射为空气声波。这种植物内部木质部空化导致机械振动的机制被广泛认为是植物遭受胁迫后发声的物理原因。但是迄今为止,人们依然没有直接观测到植物内部单个空化气泡的振动,传统研究通过多种振动传感器捕捉振动信号,也难以区分空化振动与环境噪声,更无法实现对植物内部单个空化气泡振动的直接观测。

近年来,光纤传感技术的发展为解决这一问题提供了新思路。光纤传感器因其体积小、耐腐蚀的特性以及具备实时监测能力而得到广泛应用,其中纤端法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)干涉仪型传感器发展至今,在温度[7-8]、力[9]、生物医学[10-11]、应变[12]及气体检测[13]等领域展现了高效测量能力,其通过腔长调控、弹性结构设计及光谱匹配等创新方法,兼具高灵敏性、低成本和抗干扰等特性[14-17]。F-P干涉仪型传感器与光纤结合拓宽了其在生物医学、材料科学和工业检测等复杂场景的应用。2020年,Ma等[18]开发了一种基于微结构的单模光纤尖端光热生成微泡的超声传感器,通过构建气-水界面灵敏的微型F-P腔,并结合全光纤干涉技术,实现了对10 μm微泡宽带超声波的检测。这为揭示植物发声的物理机制提供了技术突破方向和理论基础。

为深入解析植物发声的物理机制,本研究提出基于F-P微腔的纤端仿生导管空化振动的监测技术,旨在通过仿生结构揭示振动的物理机制。同时结合显微镜进行实时观测,实现对单个空化气泡内液滴融入、液面跳跃导致的液面振动图像及振动信号的同步捕捉。

1　植物导管空化及其纤端F-P腔仿生测量原理

植物导管分布于维管束木质部,与木纤维、薄壁细胞共同构成输导-支持复合结构,根据次生壁加厚模式可分为环纹导管、螺纹导管、梯纹导管、网纹导管和孔纹导管(具缘纹孔导管)5类。

植物木质部导管的尺寸因种类、环境和功能而异。导管直径通常为20~500 μm,木本植物(如树木)的导管较粗(100~500 μm,部分热带树种可达800 μm),草本植物较细(20~200 μm),而干旱地区的植物导管更窄(20~50 μm),这种结构适应性变化有利于减少水分运输中的气泡栓塞风险[19]。

本研究根据植物木质部导管的实际尺寸和结构,进行仿生导管的设计,如图1(a~d)所示,对环纹导管结构进行设计制备。选择环纹导管的原因是其常见于初生木质部,当其内部发生空化现象时,气液界面会经过环纹间较光滑的部分,对光滑部分进行设计制备,可大大降低导管设计难度,同时符合实验需要。仿生导管的整体设计思路如图1(d)所示,在纤端仿照植物木质部导管结构制备仿生导管。光滑导管设计为直径80 μm的直通通道,其内壁粗糙度控制在5 nm左右,以模拟植物初生木

质部的轴向输运特性。

将制备好的样品置入水环境,由于导管与光纤端面连接处封闭,水难以直接进入并填满导管,进而在导管内形成气泡。气泡上侧气液界面(空气-水界面)与光纤端面形成F-P平凹构型干涉腔,这种平凹腔的构型有助于提高F-P腔的精细度系数,凹面的聚焦效应可抑制光束发散,降低衍射损耗(图1(e))。激光通过光纤传输至端面,部分光被端面反射(参考光),透过端面的光入射到气液界面后被二次反射(信号光)。2束光返回光纤后发生干涉,形成F-P共振峰。气液界面受扰动后,腔长(d)发生变化,腔长每改变Δd,共振峰波长偏移量为$\Delta\lambda$。条纹计数法[20]公式为

$$d=\frac{\lambda_n\lambda_{n+1}}{2(\lambda_n-\lambda_{n+1})},\tag{1}$$

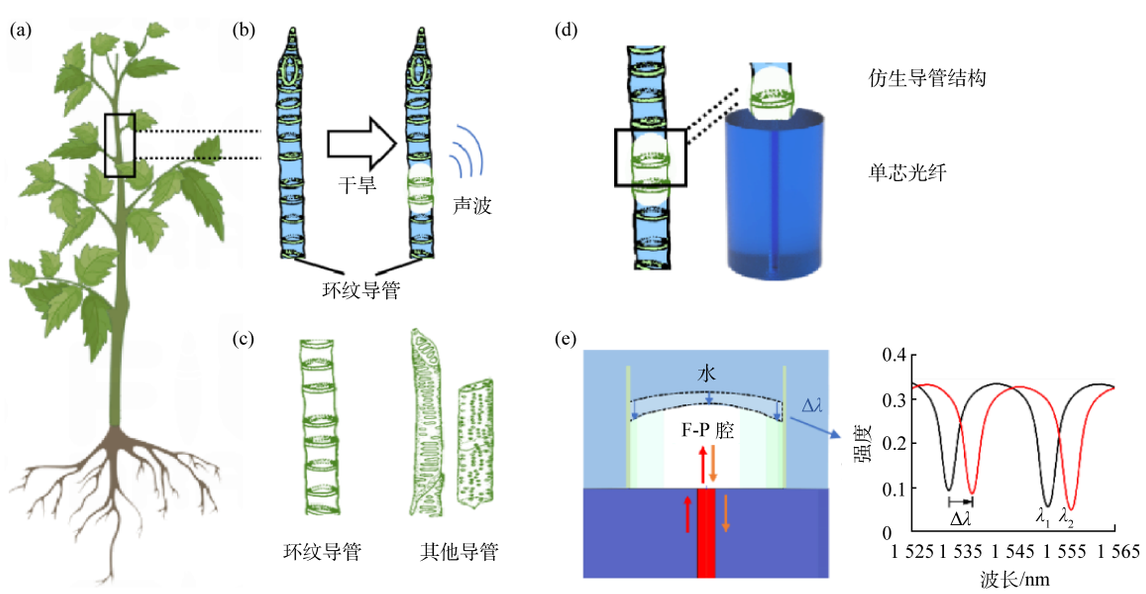
式中λ_n和λ_{n+1}表示共振峰波长的漂移。通过光谱仪检测λ_n和λ_{n+1},利用条纹计数法可反推腔长变化,进而计算出变化后的腔长。平凹F-P腔通过气液界面位移调制光程差,将机械信号转化为可测光学信号。核心在于共振波长与腔长的线性依赖关系,结合光纤的小型化特性,可实现微纳尺度的高精度传感。

2　纤端仿生导管内液面振动的研究

2.1　纤端仿生导管的制备、内部F-P腔的形成及腔长变化分析

纤端仿生导管结构如图2(a)所示,图2(b)为其扫描电镜图,图2(c)为其结构在空气中的显微镜图,将结构放入水中后,结构在水中形成的平凹F-P腔如图2(d)所示。制备中所采用的光刻胶为IP-L 780,其折射率为1.52,通过双光子3D光刻技术制备的结构可达到亚微米级结构精度。

为了开展植物导管空化振动的仿生实验,本文构建了一套测试系统,如图2(e)所示。该系统使用可调谐激光器(TLB-6728-P,Newport Ltd.,USA)作为光源。激光通过环形器传输,并经由光纤端面和气液界面反射,2束反射光再次通过环形器传输至探测器,探测器将光信号转化为电信号传输至示波器。整个测试过程在显微镜下进行观察,通过显微镜可以观察到结构内气液界面的变化,同时在示波器上可以观测到F-P腔的干涉波形,如图2(f)所示。通过条纹计数法[20]计算得出的测试过程中腔长的变化如图2(g)所示。



注:图(e)中插图是纤维F-P腔的共振光谱响应曲线。

图1　植物导管空化及其纤端F-P腔仿生测量原理示意

(a)遭受胁迫的植物;(b)植物内部在干旱胁迫下发生空化;(c)植物内部3种导管类型;(d)纤端空化导管设计示意;(e)纤端法布里-珀罗腔的构建及工作原理示意

Figure 1　the schematic of plant xylem cavitation and the measurement principle of the bionic F-P cavity on optical fiber tip

(a)the stressed plant;(b)cavitation occurring in the plant interior under drought stress;(c)three types of xylem vessels in the plant;(d)schematic design of cavitation vessel on optial fiber tip;(e)construction and working principle of F-P cavity on optical fiber tip

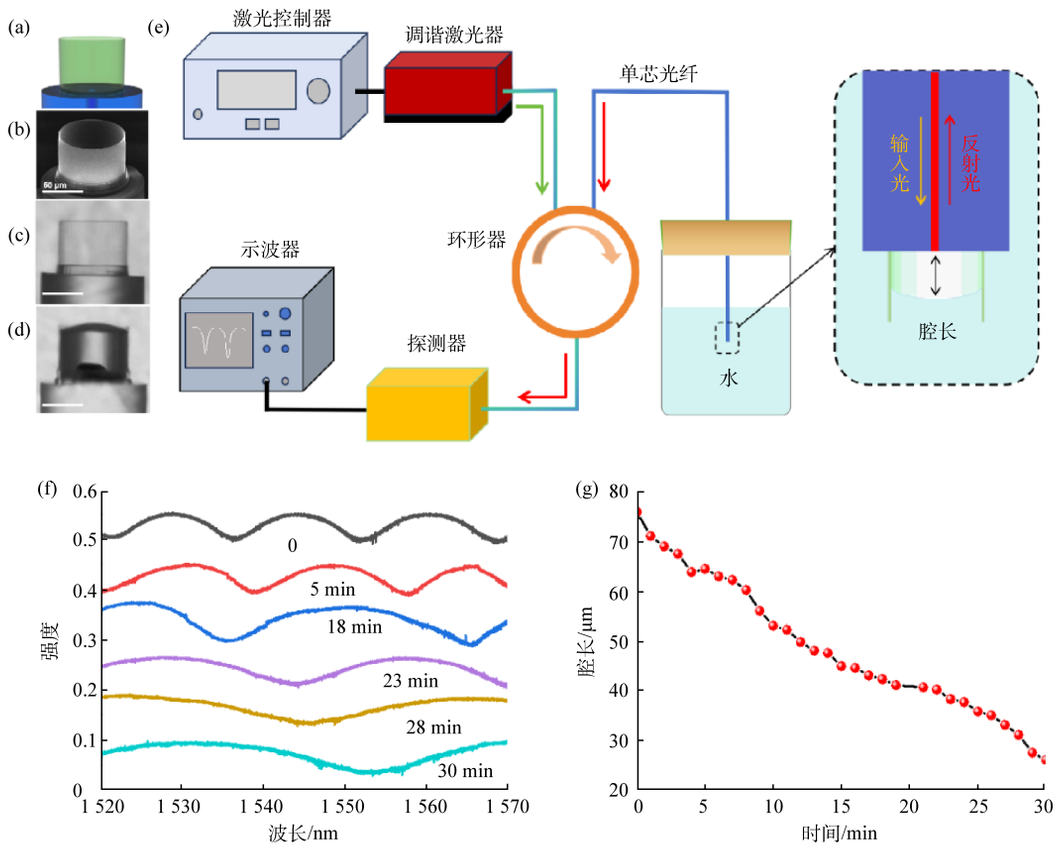


图2　仿生导管测试

(a)仿生导管结构示意;(b)仿生导管扫描电镜图;(c)空气中仿生导管显微镜图;(d)水中仿生导管显微镜图;(e)测试系统示意;(f)随时间变化的仿生光滑导管F-P腔光谱;(g)随时间变化的腔长

Figure 2　the testing of the bionic vessel

(a)schematics of the bionic vessel;(b)scanning electron microscope image of the bionic vessel;(c)microscopic image of the bionic vessel in air;(d) microscopic image of the bionic vessel in water;(e)schematics of the test system;(f)spectra of the bionic F-P cavity of at different time;(g)cavity lengths at different time

分析图2中的实验结果表明:腔长越长,品质因子 $Q=\frac{2\pi L}{\lambda(1-R_1R_2)}$ 越高,共振峰越尖锐,能够分辨更小的频率偏移(对应更微小的腔长变化)。对于入射角为0°的情况,F-P腔的谐振条件为 $2nd=m\lambda_m$ (m 为整数),两边取微分(假设 n 和 m 不变)并整理可得 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta d}=\frac{\lambda}{d}$,可知波长变化与腔长变化的比值由 λ/d 决定,比值越大,测量腔长的灵敏度越高。

图2(g)中展现出平凹F-P腔腔长随时间增加不断减小的现象,这是由于导管内的空气不断通过水和导管壁(光刻胶材料具有透气性)向外排出,导致气泡体积减小。实验表明腔长从75 μm减小到25 μm耗时30 min。腔长的缓慢变化为观测液面的振动提供了充足的时间,避免因快速动态过程导致信号丢失。

2.2　2种液面振动的观测及触发机制分析

液面爬行中的跳跃造成的光谱变化表现为干涉波形发生突变,但未打破整体连续性;导管壁上凝结的液滴与气液界面融合触发的振动在光谱上表现为干涉波形发生突变,且连续性被破坏。在测试过程中,通过显微镜的实时观察,显示有2种方式可以触发气液界面的振动,从而引发F-P腔腔长变化:一种是液面在导管内部爬行过程中会发生跳跃,这种液面的跳跃行为人们已经在各种各样的液面变化中观测过[21],由于液面跳跃的过程不会引起腔长的较大变化,如图3(a)所示连续性未变的光谱对应了这种振动触发机制;另一种是导管壁上会凝结液滴,这些液滴逐渐增大直至接触到气液界面并与之融合,从而触发液面的振动,这个过程引起较大腔长变化,对应光谱如图3(b)所示,这种液面振

动触发的方式在关于植物发声的研究中还未见报道。

实验中观测到,当激光波长固定后,激光强度突变前后的变化分为强度减小、强度增加以及保持不变3种情况。根据上述F-P腔腔长变化与共振峰的关系分析可知,固定激光波长时观察到的3种变化本质上与初始设定的波长位置有关:若固定激光波长位置处于F-P腔共振波形最低处,则突变前后的强度除保持不变外只会增加;若处于F-P腔共振波形最高处,则突变前后的强度除保持不变外只会减小;若处于F-P腔共振波形中间,则突变前后的强度变化3种情况都可以发生。

通过实验观察可知,激光强度突变的频次会随着激光能量的增大而增加。实验中将激光波长固定在共振峰附近,将激光的能量从4 mW以1 mW为步长增加到20 mW,并在18 s内观测突变的次数,见图3(c)。

可以看到在激光器能量较低时,突变发生的次数较少,当激光能量≤10 mW时,18 s内发生突变的次数<1次。当激光能量达到15~20 mW时,振动发生的频率显著增加,18 s内约发生6次振动。激光能量越大,振动发生的频次越高。这是由于:一方面气泡内气体向外渗透的速率受温度影响较大,温度越高,气体向外渗透越快,致使气泡界面爬行速度加快,跳跃增多;另一方面,气泡内温度越高,在导管内壁形成液滴的凝结速度越快,进而液滴融入

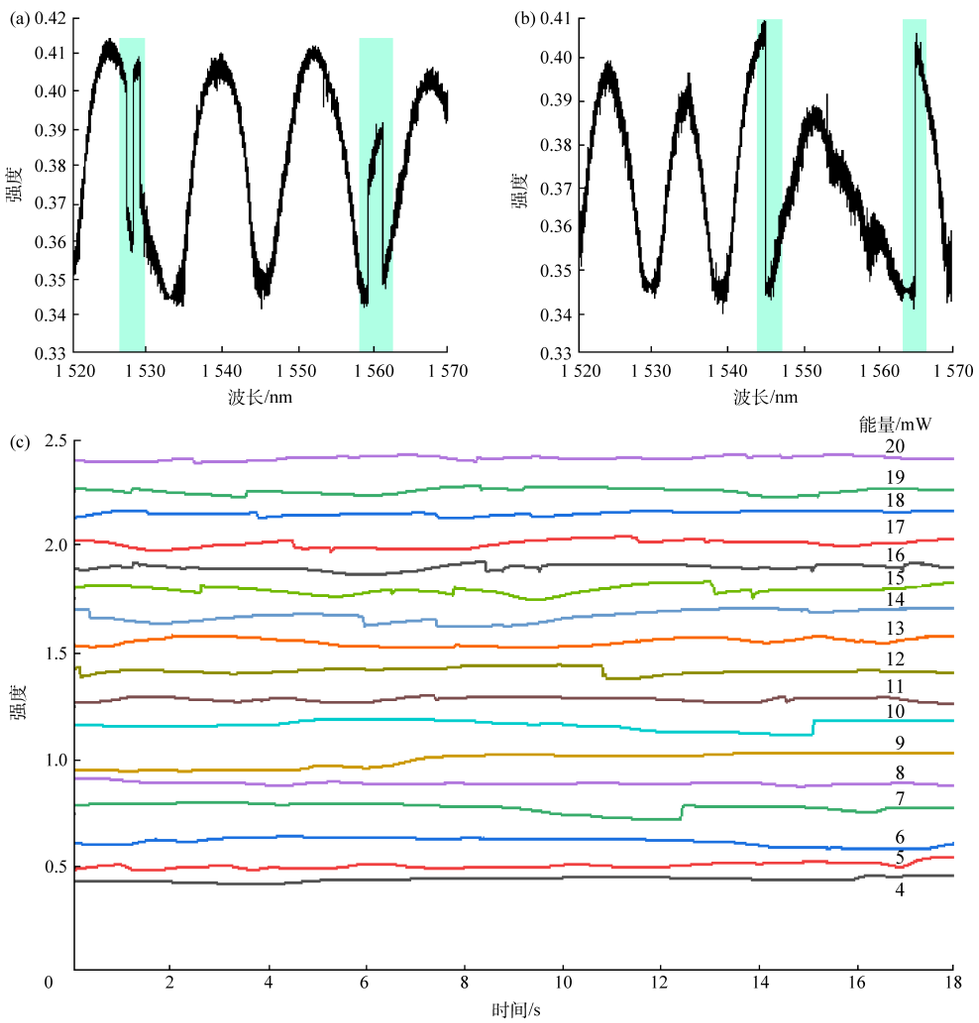


图3　纤端仿生导管内2种液面振动光谱

(a)液面爬行过程中发生跳跃造成的光强突变光谱;(b)导管内壁水滴融入液面造成的光强突变光谱;(c)不同激光能量下仿生导管光强突变时域

Figure 3　the spectra of two types of liquid surface vibrations in the bionic vessel on optical fiber

(a)the sudden changes in light intensity caused by jumps during the liquid surface crawling process;(b)the sudden changes in light intensity caused by water droplets on the inner wall of the vessel merging into the liquid surface;(c)time-domain diagrams of the light intensity mutation of the bionic catheter under different laser power

气液界面的频次增多。

2.3　液面振动的频域分析

为了深入分析波形图与气液界面振动之间的对应关系,利用示波器的触发功能捕捉了大量的振动波形。图4(a和b)给出了2种典型的突变附近的振动时域波形,直观地展示了液面振动的过程。振动持续时间为0.1~0.2 ms,图4(a)振动中同时包含高频和低频成分,且突变前后激光能量增加。这意味着突变前后腔长发生了较大的改变,这与前述液体融入气液界面过程相对应。研究认为低频成分是由液滴融入气液界面造成的。图4(b)中则没有低频成分,且突变前后光强基本保持不变。这意味着突变前后腔长变化很小,这对应着液面爬行中的跳跃。图4(c)给出了图4(a)(黑色曲线)和图4(b)(红色曲线)的傅里叶变换,可知振动主频成分集中在10~80 kHz,在61 kHz的位置,存在固定频率。与图4(a)相比,图4(b)的低频成分较少,与前述2种振动触发机制解释保持一致。这些信号的频率范围与文献中报道的植物发声频率范围相吻合[6]。

考虑到可能包含的振动模态范围,由内壁凝结的水滴与气液界面融合引起的空化振动包含的可能振动模态数量更多,而气液界面在导管内部爬行的振动过程相对平缓,包含的可能振动模态也较少。图4(c)的频域分析与这一事实相吻合。

为了确定实验中捕捉到的振动信号对应的共振模式,采用COMSOL公司的多物理场仿真软件(COMSOL multiphysics,CM)对仿生导管的空化现象进行模拟,借鉴Gritsenko等[22]在圆形微腔中捕获气泡振荡行为并提出的可量化单气泡共振频率的理论模型,得到的模拟结果如图5所示。图5(a)展示了仿生导管空化现象的建模示意,图5(b)则是基于声学模块和流体动力学模块对仿生导管空化现象的模拟结果。图5呈现了9种振动模态模数(l,m)及其对应的共振频率,l为波数,m为方位角波数,这些频率值的范围相当广泛,最低频为29 446 Hz,最高频为190 150 Hz。

由于表面模式由表面张力控制,为了进一步研究仿生导管空化现象的振动发声与导管半径之间的关系,设水的黏度可忽略不计,则模数$l>1$的共振频率计算公式[23]为

$$f_1=\frac{1}{2\pi a}\left[\frac{(l-1)(l+1)(l+2)\gamma}{\rho_0 a}\right]^{1/2},\qquad(2)$$

式中:a是空化现象气泡的半径,取值为1.0(等温情况)~1.4(各向同性声场);γ是表面张力系数;ρ_0为水的密度。

通过对比不同半径下基于声学模块和流体动力学模块的空化振动仿真结果,以及气泡在表面张

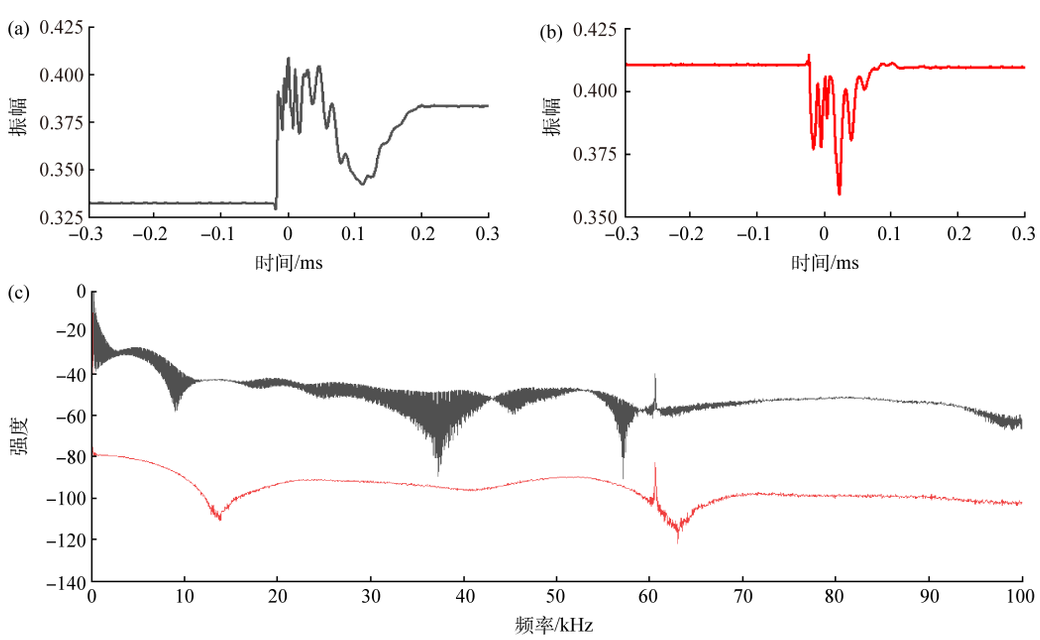


图4　仿生光滑导管空化振动测试

(a)导管内壁水滴融入液面引发振动的时域;(b)液面爬行过程中发生跳跃引发振动的时域;(c)为(a)和(b)对应的频域

Figure 4　cavitation vibration test of the bionic smooth vessel

(a)vibrations caused by water droplets on the inner wall of the vessel merging into the liquid surface;(b)vibrations caused by jumps during the liquid surface crawling process;(c)the corresponding frequency-domain diagrams of (a) and (b)

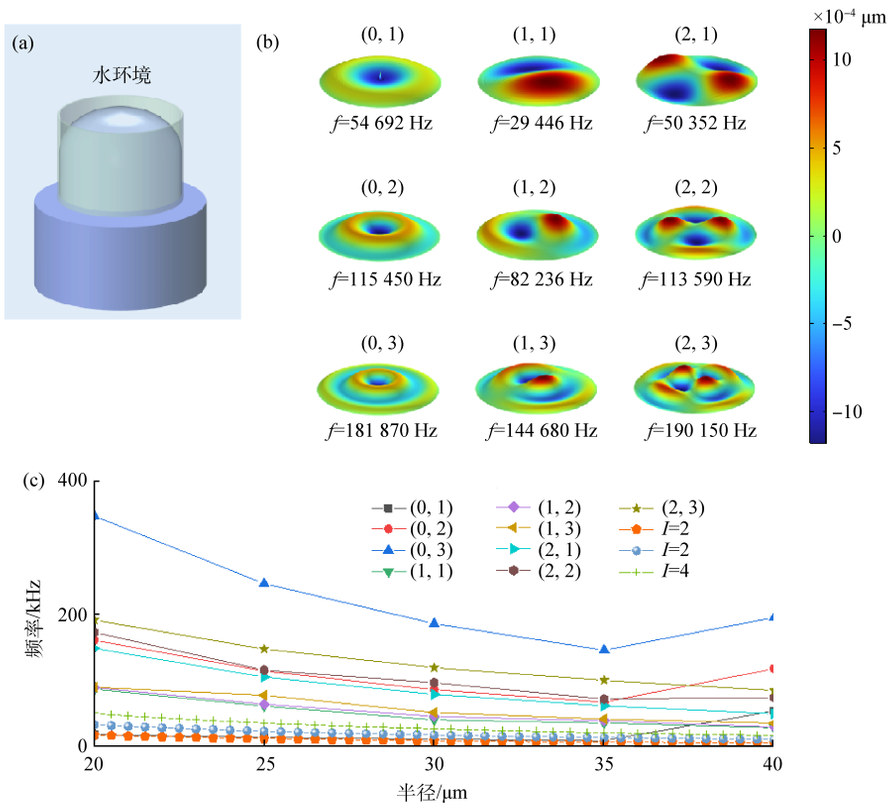


图5　仿生导管空化振动模态模拟

(a)空化振动建模示意;(b)空化振动模拟振动模态;(c)表面张力作用下不同半径的气泡与空化振动模拟结果

Figure 5　the simulation of the modes of the liquid surface vibrations in the bionic vessel

(a)the model used in the simulation;(b)various modes excited on the liquid surface;(c)the simulated results show that the frequencies of different modes are varying with the radius of the bubble

力作用下的特征模态对应共振频率可知,图5(c)虚线展示了气泡在表面张力下的特征模态,实线代表不同半径下基于声学模块的空化振动仿真结果。分析表明,同一模态在不同半径下对应不同的共振频率,揭示了空化现象的振动特性与半径的紧密关联。

由于导管的存在,空化现象中的气泡受到更多因素的影响,导致其共振频率相比仅受表面张力作用的气泡有所提高。在测试中专注于0~100 kHz内的振动现象,计算表明随半径的减小高阶模态的共振频率显著升高(>100 kHz),模拟结果的趋势与番茄和烟草植物在不同处理(如干旱压力和切割)下发出的超声波声音[6]相吻合。随着气泡半径的增大,二者的共振频率变化均呈现下降趋势,但其之间存在显著的频率差异,这可能是由于导管自身的刚性以及其他影响因素所致。

3　结　论

本研究针对植物发声机制这一问题,通过模拟初生木质部的导管构型,利用纤端微纳结构传感技术,在单模光纤端面上设计并制备仿生导管结构——光滑导管(直径80 μm,粗糙度5 nm左右)。通过构建F-P腔结合光纤传感技术实现了微米尺度液面振动的监测。实验中发现了液面爬行跳跃与液滴融合2种激发气液界面振动的机制。实验结果表明,仿生导管空化振动信号的主频(10~80 kHz)与植物干旱胁迫下发出的超声频率特征相一致。此外,COMSOL多物理场仿真进一步验证了导管约束下气泡振动频率与半径的负相关性,证实了刚性结构对共振频率的提升效应。本研究不仅为植物发声的机制研究提供了新的视角,也推动了纤上传感器件的发展。

©The editorial department of Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition) 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参 考 文 献

[1] LÓPEZ-RIBERA I, VICIENT C M. Drought tolerance

induced by sound in Arabidopsis plants [J]. Plant Signaling & Behavior, 2017, 12(10): 1368938. DOI: 10.1080/15592324.2017.1368938.

[2] ZHANG H Y, DOMEC J C, MAIER C A, et al. Similar response of canopy conductance to increasing vapor pressure deficit and decreasing soil conductivity with drought among five morphologically contrasting but co-occurring pine species [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 366: 110479. DOI: 10.1016/j.agrformet.2025.110479.

[3] BALZANO A, AMITRANO C, ARENA C, et al. Does pre-acclimation enhance the tolerance of *Quercus ilex* and *Arbutus unedo* seedlings to drought [J]. Plants, 2025, 14(3): 388. DOI: 10.3390/plants14030388.

[4] MILBURN J A, JOHNSON R P C. The conduction of sap. II.detection of vibrations produced by sap cavitation in *Ricinus* xylem [J]. Planta, 1966, 69(1): 43-52. DOI: 10.1007/BF00380209.

[5] DUTTA S, CHEN Z Y, KAISER E, et al. Ultrasound pulse emission spectroscopy method to characterize xylem conduits in plant stems [J]. Research, 2023(1): 139-152. DOI: 10.34133/2022/9790438.

[6] KHAIT I, LEWIN-EPSTEIN O, SHARON R, et al. Sounds emitted by plants under stress are airborne and informative [J]. Cell, 2023, 186(7): 1328-1336. DOI: 10.1016/j.cell.2023.03.009.

[7] CHEN P L, WU Y, WANG Y Q. Optical fiber Fabry-Perot temperature sensor based on metal welding technology [J]. Journal of Nanophotonics, 2023, 17(2): 026001. DOI: 10.1117/1. JNP.17.026001.

[8] GUO M C, ZHANG Q, SU Z X, et al. Simultaneous measurement of gas pressure and temperature sensor based on F-P interference using hollow core bragg fiber [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(23): 39028-39034. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3476673.

[9] LIU Y, ZHENG R C, PENG S S, et al. Highly sensitive fiber-optic Fabry-Pérot microforce probe [J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(1): 383-389. DOI: 10.1109/JLT.2024.3451472.

[10] WANG Y F, WAN S P, LI Y J, et al. Respiratory system disease recognition based on diaphragm fiber-optic F-P sensor [J]. Sensors and Actuators A (Physical), 2025, 383: 116237. DOI: 10.1016/j.sna.2025.116237.

[11] WANG R D, YAN M L, JIANG M, et al. Label-free and selective cholesterol detection based on multilayer functional structure coated fiber Fabry-Pérot interferometer probe [J]. Analytica Chimica Acta, 2023, 1252: 341051. DOI: 10.1016/j.aca.2023.341051.

[12] WANG Y, WU Y, TANG M. Optical fiber Fabry-Pérot strain sensor based on metal welding [J]. Optical Fiber Technology, 2024, 82: 103629. DOI: 10.1016/j.yofte.2023.103629.

[13] LYU Y, XIE P, XU J, et al. Methane measurement method based on F-P angle-dependent correlation spectroscopy [J]. Optics Express, 2024, 32(13): 23646-23662. DOI: 10.1364/OE.526026.

[14] LIU Q P, LI X R, WANG D Y, et al. Modelling and design of fiber optic Fabry-Pérot accelerometer with high figure merit [J]. Optical Fiber Technology, 2024, 84: 103778. DOI: 10.1016/j.yofte.2024.103778.

[15] WANG E B, NIU H J, LI P, et al. Optical fiber F-P cavity pH sensor based on polyaniline reaction deposition film layer [J]. Measurement, 2025, 243: 116454. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.116454.

[16] GUO X C, PEI Y Y, ZHANG J Z. Numerical analysis of relative intensity noise of distributed-feedback fiber lasers considering spatial mode profile [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2024, 60(6): 1-10. DOI: 10.1109/JQE.2024.3468998.

[17] HUANG Y, CHEN H W, ZHANG L N, et al. Improved dual-wavelength demodulation technique based on prior information for fiber optic Fabry-Pérot ultrasonic sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(18): 6444-6450. DOI: 10.1109/JLT.2024.3416989.

[18] MA J, HE Y, BAI X, et al. Flexible microbubble-based Fabry-Pérot cavity for sensitive ultrasound detection and wide-view photoacoustic imaging [J]. Photonics Research, 2020, 8(10): 1558-1565. DOI: 10.1364/PRJ.394941.

[19] SMITH-MARTIN C M, JOHNSON K M, URQUHART S, et al. Increasing air-filled vessels has little influence on vulnerability to drought-induced embolism in two species with long maximum xylem vessel length but low vessel connectivity [J]. Tree Physiology, 2025, 45(5): tpaf041. DOI: 10.1093/treephys/tpaf041.

[20] MURPHY K A, GUNTHER M F, VENGSARKAR A M, et al. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Pérot optical fiber sensors [J]. Optics Letters, 1991, 16(4): 273-275. DOI: 10.1364/OL.16.000273.

[21] DUTTA S, BIELING T J, VERBIEST G J. Evaporation induced acoustic emissions in microfluidic vessels [J]. Royal Society Open Science, 2023, 10(12): 231029. DOI: 10.1098/rsos.231029.

[22] GRITSENKO D, LIN Y, HOVORKA V, et al. Vibrational modes prediction for water-air bubbles trapped in circular microcavities [J]. Physics of Fluids, 2018, 30(8): 082001. DOI: 10.1063/1.5037328.

[23] TEMKIN S. Suspension acoustics: an introduction to the physics of suspensions [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

(责任编辑:兰丽丽)