

# 用于非接触超声洁牙的压电换能器设计

任 滢<sup>1</sup>, 秦 智<sup>1</sup>, 袁 宝<sup>1</sup>, 李成皓<sup>2</sup>, 周 静<sup>1</sup>, 沈 杰<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 上海极橙医疗科技有限公司, 上海 200030)

**摘要:**设计了一种非接触式的超声洁牙装置。通过12个超声变幅单元并联组合成牙套式阵列结构,突破了口腔有限空间内对换能器声发射能力的限制。采用声-结构耦合有限元模拟和回归分析,在300~400 kHz工作频段优选PZT-5H为压电相,优化了透声层内空心圆锥形变幅杆设计。其辐射到牙列表面的平均声功率为2.32 W,正、负相最小声压幅值分别为794.668 kPa、-800.854 kPa。声场分布分析表明,在300~400 kHz频段内扫频激励产生的混响声场可以覆盖整个牙列,实现全方位的超空化非接触式洁牙。

**关键词:**非接触式超声清洗;有限元模拟;牙套式超声洁牙装置;弯曲振动压电换能器

**中图分类号:**TN384;TB33 **文献标识码:**A

## Design of Piezoelectric Transducer for Noncontact Ultrasonic Dental Cleaning

REN Ying<sup>1</sup>, QIN Zhi<sup>1</sup>, YUAN Bao<sup>1</sup>, LI Chenghao<sup>2</sup>, ZHOU Jing<sup>1</sup>, SHEN Jie<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Orange Dental Technology Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

**Abstract:** A noncontact ultrasonic dental cleaning device is designed in this study. It addresses the limitation of a transducer's acoustic transmitting power due to the space in the oral cavity by combining 12 ultrasonic horn units in parallel to form a braces-type array structure. Results of acoustic-structural coupling finite-element simulation and regression analysis show that the piezoelectric-phase type is PZT-5H, which features a hollow conical ultrasonic horn in the acoustic-permeable module. The average acoustic power radiated to the dental surface is 2.32 W, and the minimum positive-and negative-phase acoustic pressures are 794.668 and -800.854 kPa, respectively, between 300 and 400 kHz. The acoustic field encompassing the entire dentition can be generated by sweeping frequency cleaning in this frequency band. Finally, the device can achieve complete supercavitation and noncontact dental cleaning.

**Key words:** non-contact ultrasonic cleaning; finite element simulation; braces-type ultrasonic scaler; bending vibratory piezoelectric transducer

## 0 引言

日常采用传统的刷毛与牙齿机械摩擦的方法清洗口腔,对于牙龈敏感者,因刷毛易触碰到牙龈造成刺激而引起疼痛甚至出血。利用脉冲水流的冲牙器清洁牙齿,在一定压力下高速水流冲击可能会损伤口腔黏膜。利用超声波振动和空化综合效应的超声波洁牙机<sup>[1]</sup>,对牙垢、牙石等有较为理想的清洁效果,同时其非接触的工作原理可有效避免因物理接触对牙龈产生的刺激和伤害。但超声波洁牙机是专业医疗人员操作的医疗器械,患者通常是在有严重牙垢时才选择定向就医清理。因此,开发面向日常牙齿清洁的便捷非接触式装置,对牙科医

学和健康产业的发展具有现实意义和重要价值。

Schmidt等<sup>[2-5]</sup>通过体外实验探索了动力牙刷非接触去除牙齿表面生物膜的可行性,且对比了侧模式、多维模式的电动牙刷以及超声波牙刷非接触式生物膜去除的效果,多数研究发现生物膜去除率超过50%。流体动力现象、通过气液界面和声能传递引起的分离力被认为是导致生物膜减少的原因。然而,该非接触作用只在现有牙刷工作中起辅助作用,并未从根本上改变牙刷的物理接触方式,且单次只能清洁一到两颗牙齿,清洁效率不高。目前,市场上尚无完全非接触且可对牙列进行全方位高效清洁的洁牙装置。

收稿日期:2024-02-23

作者简介:任滢(1995-),女,四川省广安市人,硕士生。通信作者:沈杰(1981-),男,湖北省武汉市人,博士,教授。

超空化效应是利用微气泡在声压作用下生长和破裂,通过空泡坍塌瞬间释放的剪切力使污物层分散、剥离。Miranda等<sup>[6]</sup>将超空化作用到水膜上,探索了非浸没式超声波清洗大面积表面(墙壁、地板、立面)的可行性。受其启发,可将该方法应用于复杂形状表面的牙齿清洁。本文设计了以具有辐射阻抗低,易与空气和水等介质实现声匹配特点的弯曲压电超声换能器<sup>[7]</sup>为核心的牙套式超声洁牙装置,在口腔非浸没环境下利用超空化效应进行非接触洁牙。

超空化效应的产生需要声波声压超过水介质的空化阈值,频率越高,则空化阈越高,如175 kHz、365 kHz、500 kHz频率下的超空化阈值分别为400 kPa、700 kPa、1 200 kPa<sup>[8]</sup>。超空化效应的强弱直接影响洁牙效果。但是口腔空间限制了换能器设计尺寸,进而限制了换能器的声发射能力。因此,本文通过有限元模拟优化选材和结构参数,增大发射声压超过水介质的空化阈值,以满足日用非接触式牙齿表面清洁应用要求。

## 1 声学有限元模型

### 1.1 结构设计

超空化效应原理如图1(a)所示。为了实现全方位的口腔清洁,本装置采用上下对称的牙套式结构,包括牙套封层、牙套本体和方便牙齿咬合的垫板,如图1(b)所示。牙套本体内包括吸声层、透声层,以及由压电双晶片和透声层内开空心变幅杆(其位置与牙齿对应)组成的12个方位的超声变幅单元,如图1(c)、(d)所示。硅橡胶作为吸声层材料,选择易于调配和真空除气的环氧树脂作为透声层材料且黏结元件<sup>[9]</sup>。

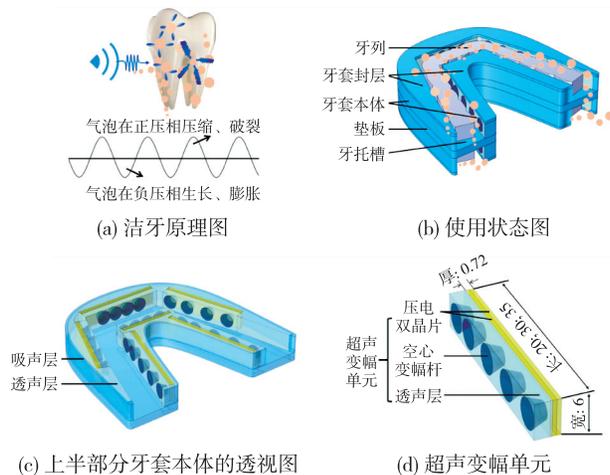


图1 装置结构图

压电双晶片的尺寸设计以成人中切牙牙弓宽度(20 mm)、侧切牙牙弓宽度(30 mm)、尖牙牙弓宽度(35 mm)和牙冠冠长(6 mm)为依据,厚度设计以人体安全电压36 V驱动为限(场强100 V/mm)。确定压电双晶片长度分别为20 mm、30 mm、35 mm,宽度均为6 mm,厚度均为0.72 mm,如图1(d)所示。各组件的材料类型如表1所示。

表1 该模型主要组件的材料类型

组件	材质
牙套封层	硅橡胶
垫板	硅橡胶
吸声层	硅橡胶
透声层	环氧树脂
压电双晶片	PZT
牙列	羟基磷酸钙

### 1.2 声-结构耦合有限元计算方法

采用COMSOL软件并基于压力声学的基本理论建立声学有限元仿真模型(见图2(a)-(b)),其包括装置、水域和完美匹配层,用于模拟声波传播时的吸收情况。预定义的接口包括压力声学(频域),固体力学和静电学。通过压力声学、固体力学分别求解水域和结构材料中的波动方程,并在压电双晶片上求解静电学接口。声-结构边界节点在水域和固体交界面上有效。通过压力声学界面计算得到流体压力作用于固体力学界面。压电效应仅在压电双晶片上有效,通过线性本构方程耦合固体力学和静电学方程。每组并联型压电双晶片采用各向同性损耗因子为0.001的机械阻尼类型。以 $d_{33}$ 厚度模式振动,驱动电压为36 V,如图2(c)所示。同时,12个方位的换能单元以电学并联,机械串联的方式工作。计算网格类型为自由四面体。

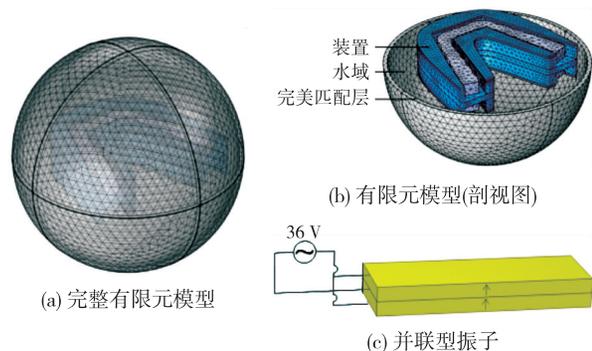


图2 有限元模型

### 1.3 性能分析方法

为提高清洁效率和口腔适应性,清洁装置发射

到牙列表面的声场应是宽频混响场。本文通过分析 20~600 kHz 频段内换能器频率响应下的牙列表面的正、负相声压幅值,声辐射功率以及声阻抗比的离散度,研究了该装置的结构响应特性。

当强超声波作用于液体媒介时,若交变声压幅值  $P_m$  大于液体的静压力  $P_0$ ,负压幅值 ( $-P_m$ ) 可在液体中形成局部性的负压作用区,拉断液体形成空腔,即产生空化气泡;当声压的正压相到来时,空化气泡闭合并崩塌,由此剥离牙齿表面的污垢。

声辐射功率反映辐射到牙齿表面的能量关系。声阻抗比  $Z_{aco}$  为接触水的牙托槽侧壁表面的阻抗与水的特性阻抗之比,有

$$Z_{aco} = \frac{\left(\int p da_A\right) / \left(\int v_n da_A\right)}{Z_0} \quad (1)$$

通过声压  $p$  的面积积分与表面结构速度  $v_n$  的法向分量的面积积分之比计算接触界面的阻抗。通过 293.15 K 时水中声速与密度的乘积计算水的特性阻抗  $Z_0$ 。为了降低声阻抗失配导致的声能损耗,本文以牙托槽侧壁与水介质交界面的声阻抗比的回归值 1 为参考<sup>[10]</sup>,通过总离差平方和(TSS)对比分析了透声层内开不同孔结构的显著性差异,即

$$TSS = \sum (y_i - 1)^2 \quad (2)$$

式中  $y_i$  为不同频率下的声阻抗比。

## 2 结果与讨论

超声变幅单元是水介质产生空化所需声压的关键。影响单元声辐射特性的参数分为物性、结构两类,物性参数包括压电材料的种类及其压电常数,结构参数包括有无空心变幅杆及其形状。不同于结构参数,“物性参数”组分的优选过程无需建立一个新的声学有限元模型,因此,本文首先对压电相进行材料优选。

### 2.1 压电陶瓷的种类对声辐射特性的影响

完整的透声层模型分别与高机电耦合系数的 PZT-4、PZT-5H、PZT-8 压电双晶片构成发射型压电换能器单元,在 20~600 kHz 频段内声输出特性如图 3(a)所示。图 3(b)、(c)分别为压电陶瓷的种类对该装置输出到牙列表面的正、负相声压幅值和声辐射功率的影响。由图可知,3 种陶瓷的声压幅值随着频率的升高均增大。其中 PZT-5H 增幅最显著,且在频率 295 kHz 和 310 kHz 下分别开始出现

正、负相声压幅值陡增,其值分别为 290.480 kPa, -390.708 kPa。换能器在 300~400 kHz 频段内具有较高的声辐射功率,而 PZT-5H 的辐射功率峰更强且范围更宽。仿真结果表明,PZT-5H 的声辐射特性明显高于 PZT-4 和 PZT-8。因此,该装置的压电陶瓷类型优选 PZT-5H。

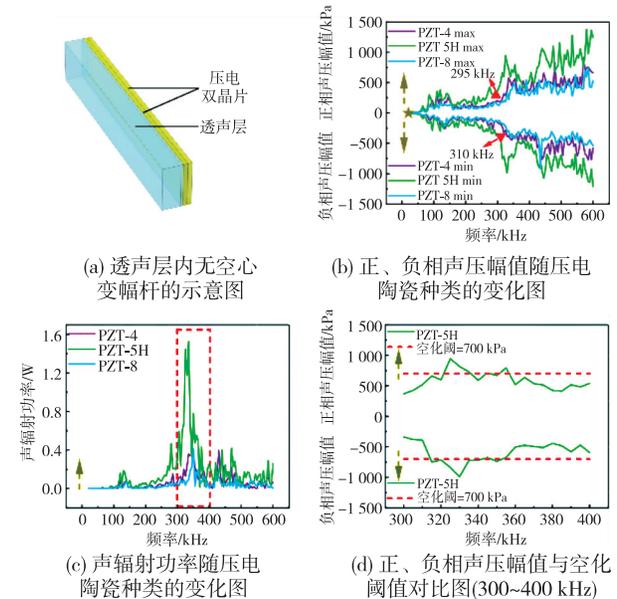


图3 压电陶瓷的种类对声辐射特性的影响规律图

由图 3(d)可见,在频段 300~400 kHz,辐射到牙列表面的正、负相声压幅值均在空化阈值临界附近(本文以频段 300~400 kHz 具有代表性的空化阈值 700 kPa@365 kHz<sup>[8]</sup>作为参考),故需进一步优化设计以提高该频段的声辐射能力。

### 2.2 空心变幅杆对声辐射特性的影响

为了进一步提升该装置的声辐射特性,本文引入变幅杆作为机械阻抗的变换器,使超声能量由换能器更有效地向负载传输。由于空间和宽频混响场的限制,需要变幅杆易于进行机械加工且输入阻抗随频率的变化较小。因此,本文选择从空心圆锥形和空心楔形<sup>[11]</sup>的变幅杆中优选设计。

空心圆锥形和空心楔形结构分别如图 4(a)、(b)所示。通过参数  $a$  表示楔形的对称度差异,如图 4(c)所示。为了尽可能放大机械振动的质点位移或速度,其中小端直径  $D_1$  为 3 mm,大端直径  $D_2$  为 5 mm,厚度为 4 mm。图 4(d)-(f)分别为无变幅杆、圆锥形时,不同  $a$  值的楔形 ( $a = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ) 输出到牙列表面的正、负相声压幅值和声辐射功率的变化趋势。由图可知,其声压幅值均随着频

率的升高而增大,且透声层内有变幅杆时增幅更显著,在频率 295 kHz 和 310 kHz 下的正、负相声压幅值分别为 514.012 kPa, -890.704 kPa,明显高于无变幅杆时的正、负相声压幅值,且均在 300~400 kHz 频段内具有较高的声辐射功率。图 4(g)为不同形状的变幅杆在 300~400 kHz 频段输出到牙列表面的平均声功率柱状图。由图可知,无变幅杆的平均声功率仅 0.53 W,且与不同对称度的楔形进行对比,圆锥形的结构具有较高的平均声功率(为 2.32 W)。

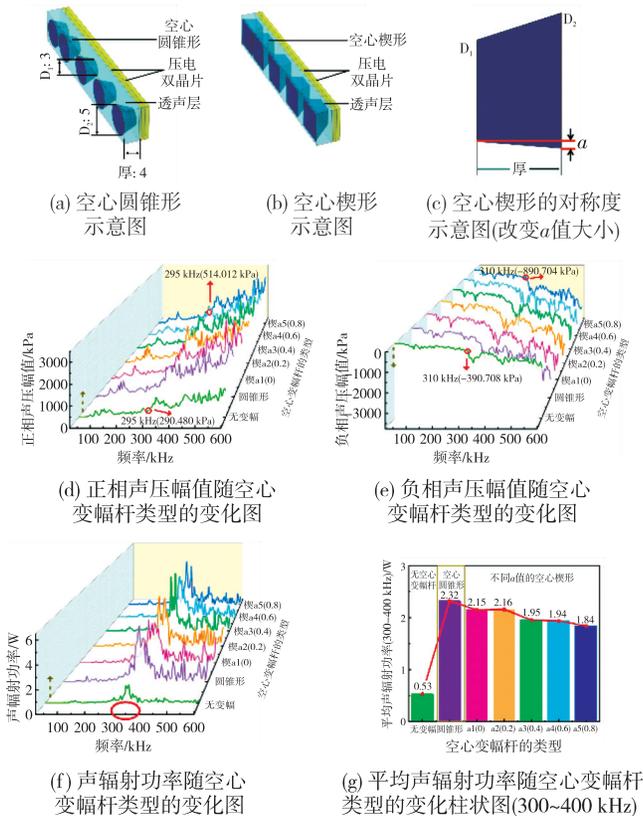


图 4 空心变幅杆对声辐射特性的影响规律图

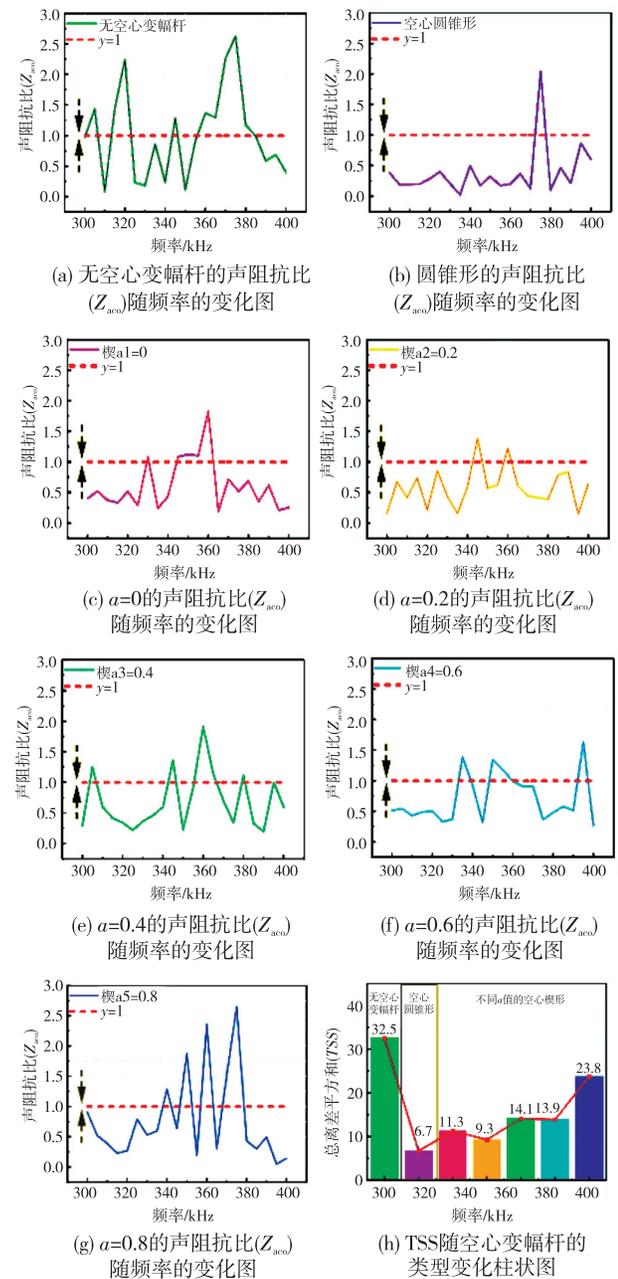
经计算,表明引入空心变幅杆可以提升装置的声辐射特性,原因在于其改变了透声层的声阻抗特性。为了分析空心变幅杆增强声辐射特性机理,本文继续研究了空心变幅杆对装置声阻抗特性的影响。

### 2.3 空心变幅杆对声阻抗特性的影响

声阻抗匹配有助于降低装置与水接触界面的声能损耗,当两种介质的声阻抗比为 1 时<sup>[10]</sup>,声波在接触界面处声能损失最少。

图 5(a)-(g)为 300~400 kHz 频段内无变幅杆、圆锥形时,不同  $a$  值的楔形  $Z_{aco}$  变化。图 5(h)为不同变幅杆声阻抗比以 1 为回归值的 TSS 柱状图。由图可知,无变幅杆时的 TSS 最高(为 32.5);

不同  $a$  值的楔形 TSS 次之;圆锥形 TSS 最小(为 6.7)。这说明在 300~400 kHz 频段内,透声层内开空心圆锥形变幅杆作为超声变幅单元在与水接触的交界面上具有较低的声能损失。图 5(i)、(j)为 300~400 kHz 频段内无变幅杆和圆锥形变幅杆结构的正、负相声压幅值对比。由图可知,圆锥形变幅杆结构的正、负相声压幅值最小,分别为 794.668 kPa, -800.854 kPa。计算结果表明,透声层内开空心圆锥形变幅杆通过提升声阻抗匹配度提高了超声变幅单元的正、负相声压幅值的输出,进而提升了该装置利用超空化效应进行超声洁牙的能力。



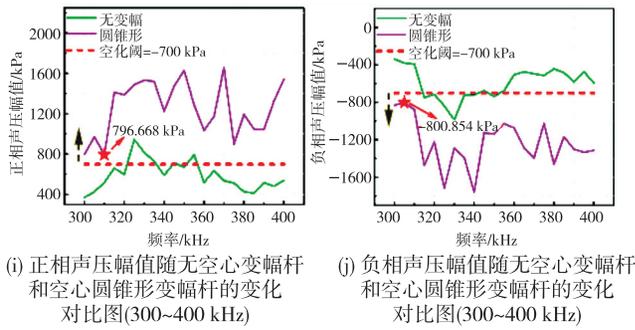


图 5 空心变幅杆对声阻抗特性的影响规律图

### 2.4 扫频清洗

单频下产生的声场通常是一个驻波场,声压分布不均匀。为使清洗效果均匀,清洗液中的声场应当是一个混响场<sup>[12]</sup>。因此,本文研究了 300~400 kHz 频段内辐射到牙列表面的声场分布。计算结果选取示例性频率 300 kHz、330 kHz、360 kHz、400 kHz 下牙列表面的声场空间分布,如图 6 所示。由图可见,特定工作频率下声压分布和声压强度的不均匀性,取决于传播过程中发生了各单元发射声波的相位叠加和相消,但不同频率下声压分布和声压强度不同,通过在 300~400 kHz 频段内采用扫频工作方式清洗,产生了覆盖整个牙列且声压强度超过水介质空化阈值的混响声场。

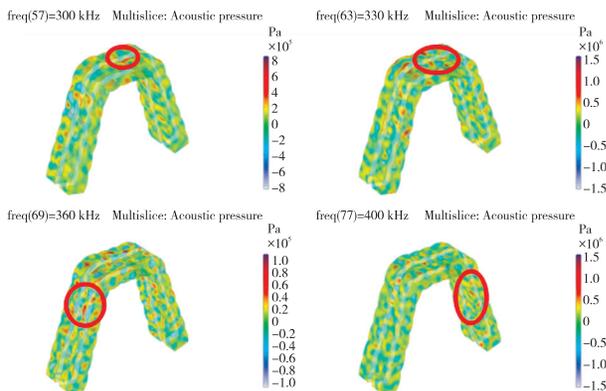


图 6 示例性频率下的牙列表面声压切片图

### 3 结束语

本文设计了一种非接触式牙套式超声洁牙装置。通过声-结构耦合有限元模拟,分析了压电陶瓷的种类和透声层内空心变幅杆的设计对该装置电-声性能的影响。研究表明,12 个方位的并联型厚度弯曲振动压电双晶片与透声层内空心变幅杆的结合组成牙套式的阵列结构,显著提高了换能器的声辐射特性。压电陶瓷优选 PZT-5H,空心变幅杆形状为圆锥形,在 300~400 kHz 频段内采用扫频

工作,正、负相声压幅值最小分别为 794.668 kPa、-800.854 kPa,在水介质中能产生较强的超空化效应。同时扫频工作方式避免了清洗“死区”,实现了牙列表面的全方位非接触清洗,提高了洁牙效率。该牙套式非接触式超声洁牙装置对日常口腔护理技术与产品研发提供了参考。

### 参考文献:

[1] ARABACI T, ÇIÇEK Y, ÇANAKÇI C F. Sonic and ultrasonic scalers in periodontal treatment: A review [J]. International Journal of Dental Hygiene, 2007, 5 (1): 2-12.

[2] SCHMIDT J C, ZAUGG C, WEIGER R, et al. Brushing without brushing —A review of the efficacy of powered toothbrushes in noncontact biofilm removal[J]. Clinical Oral Investigations, 2013, 17(3): 687-709.

[3] SCHMIDT J C, ASTASOV-FRAUENHOFFER M, WALTIMO T, et al. Influence of the oscillation frequency of different side-to-side toothbrushes on non-contact biofilm removal [J]. Clinical Oral Investigations, 2018, 22(6): 2141-2147.

[4] SCHMIDT J C, ASTASOV-FRAUENHOFFER M, WALTIMO T, et al. Influence of the amplitude of different side-to-side toothbrushes on noncontact biofilm removal[J]. Clinical Oral Investigations, 2019, 23(4): 1951-1957.

[5] SCHMIDT J C, ASTASOV-FRAUENHOFFER M, WALTIMO T, et al. Efficacy of various side-to-side toothbrushes and impact of brushing parameters on noncontact biofilm removal in an interdental space model[J]. Clinical Oral Investigations, 2017, 21(5): 1565-1577.

[6] SARASUA M J A, RUIZ-RUBIO L, ARANZABE B E, et al. Non-immersion ultrasonic cleaning: an efficient green process for large surfaces with low water consumption[J]. Processes, 2021, 9(4): 585.

[7] CHEN S, SABATO A, NIEZRECKI C, et al. Characterization and modeling of the acoustic field generated by a curved ultrasound transducer for noncontact structural excitation[J]. Journal Sound and Vibration, 2018, 432: 33-49.

[8] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 440-442.