

口腔环境对基于共振频率分析 种植修复螺丝稳定性的影响

郭珈而¹ 王晓露² 刘志鑫¹ 周建英³ 王琳¹

¹中山大学附属口腔医院, 光华口腔医学院, 广东省口腔医学重点实验室, 广东省口腔疾病临床医学研究中心, 广州 510055; ²广东省传感技术与生物医疗仪器重点实验室, 中山大学生物医学工程学院, 广州 510006; ³光电材料与技术国家重点实验室, 中山大学物理学院, 广州 510275

通信作者: 王琳, Email: wanglin7@mail.sysu.edu.cn

【摘要】 目的 探讨唾液及共鸣腔对基于共振频率分析种植义齿修复螺丝稳定性的影响。**方法** 修复下颌牙列缺失的6个种植体联合支持螺丝固位义齿作为模型, 以置于普通室内环境为对照组, 以置于仿头模内人工唾液湿润模拟的口腔环境为研究组, 使用数显扭矩扳手调整不同位置修复螺丝的预紧扭矩, 形成与修复螺丝稳定性关联的参数矩阵, 予以振动激发并采集相关声振信号加以处理, 获取对应共振频率, 绘制时频图, 计算两组各修复螺丝在15 N·cm时的共振频率及变异系数。应用Bland-Altman一致性分析法评估两组各修复螺丝稳定性相关共振频率的一致性, 应用Pearson相关性分析探讨两组各修复螺丝稳定性与相应共振频率的关系($\alpha=0.05$)。**结果** 时频图结果显示, 两组均在7~9 kHz频道范围内出现能量集中带, 且随着扭矩值降低, 能量集中带出现左移。变异系数结果显示, 实验组各修复螺丝在15 N·cm时共振频率介于(7 329±8)~(8 400±8) Hz, 变异系数为0.001~0.002。对照组各修复螺丝在15 N·cm时共振频率介于(7 329±6)~(8 463±11) Hz, 变异系数为0.000 8~0.002。Pearson相关性分析结果表明, 两组各修复螺丝稳定性与共振频率均呈线性正相关($r=0.483\sim0.937, P<0.001$), 且同一修复螺丝的相关系数值相近。Bland-Altman一致性分析结果显示, 实验组归一化后的共振频率介于0.569~0.892, 对照组归一化后的共振频率介于0.585~0.881, 两组的共振频率差异无统计学意义($t=-1.816\sim0.859, P>0.05$), 差值绝对值为0.001~0.016。**结论** 湿润和共鸣的口腔环境未对基于叩诊的种植义齿声振特征分析产生不利影响, 以共振频率反映修复螺丝稳定性具有良好的临床应用前景。

【关键词】 义齿; 种植体支持; 修复螺丝; 稳定性; 声学信号; 共振频率分析

基金项目: 广州市科技计划(201803010099)

引用著录格式: 郭珈而, 王晓露, 刘志鑫, 等. 口腔环境对基于共振频率分析种植修复螺丝稳定性的影响[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2025, 19(2):96-103.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2025.02.003

Influence of the oral environment on the stability of prosthetic screws based on resonance frequency analysis

Guo Jiaer¹, Wang Xiaolu², Liu Zhixin¹, Zhou Jianying³, Wang Lin¹

¹Hospital of Stomatology, Guanghua School of Stomatology, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Stomatology, Guangdong Provincial Clinical Research Center of Oral Diseases, Guangzhou 510055, China; ²Key Laboratory of Sensing Technology and Biomedical Instrument of Guangdong Province, School of Biomedical Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China; ³State Key Laboratory of Optoelectronic Materials & Technology, School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Corresponding author: Wang Lin, Email: wanglin7@mail.sysu.edu.cn

【Abstract】 Objective To explore the impact of saliva and resonance cavities on the stability of prosthetic screws based on resonance frequency analysis. **Methods** Mandibular edentulous gypsum casts

with screw-retained definitive fixed dental prostheses supported by 6 implants were used. The control group was placed in a standard indoor environment, while the experimental group was placed in a simulated oral environment with artificial saliva in a dental manikin. Different insertion torques were applied to the screws using a digital torque wrench, forming a parameter matrix related to screw stability. A tapping simulation was directly applied to the buccal side of the tested screw, and a pickup device was used to collect the acoustic signals. The resonance peak frequencies of these signals were extracted by using time-frequency-domain analysis based on short-time Fourier transform. The spectrograms of acoustic signal were plotted, and the coefficients of variation for each prosthetic screw at 15 N·cm were calculated for both groups. Bland-Altman analysis was used to evaluate the consistency of the resonance frequencies related to prosthetic screw stability in both groups. Pearson correlation analysis was conducted to investigate the relationship between prosthetic screw stability and corresponding resonance frequencies ($\alpha = 0.05$). **Results** The spectrograms of acoustic signal showed that both groups had energy concentration bands in the 7 to 9 kHz range, and as the insertion torque value decreased, the energy concentration band shifted left. The coefficient of variation results indicated that the resonance frequencies of the prosthetic screws in the experimental group at 15 N·cm ranged from $(7\,329 \pm 8)$ Hz to $(8\,400 \pm 8)$ Hz, with coefficients of variation ranging from 0.001 to 0.002. In the control group, the resonance frequencies ranged from $(7\,329 \pm 6)$ Hz to $(8\,463 \pm 11)$ Hz, with coefficients of variation ranging from 0.000 8 to 0.002. Pearson correlation analysis showed that a linear positive correlation between screw stability and resonance frequency in both groups ($r = 0.483 \sim 0.937, P < 0.001$) and the correlation coefficient values for the same screw were similar. Bland-Altman analysis revealed that the normalized resonance frequencies in the experimental group ranged from 0.569 to 0.892, while those in the control group ranged from 0.585 to 0.881. The differences in resonance frequencies between the two groups were not statistically significant ($t = -1.816 \sim 0.859, P > 0.05$), with the absolute difference ranging from 0.001 to 0.016. **Conclusions** The moist and resonant oral environment did not have an adverse effect on the acoustic-vibration characteristics of implant prostheses based on tapping. Acoustic resonance frequency analysis showed good clinical prospects for reflecting the stability of the prosthetic screw.

【Key words】 Dental prostheses; Implant-supported; Prosthetic screw; Stability; Acoustic signal; Resonance frequency analysis

Fund program: Science and Technology Program of Guangzhou (201803010099)

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2025.02.003

修复螺丝松动是螺丝固位种植义齿的常见机械并发症^[1]。单冠或短跨度种植义齿的修复螺丝松动容易导致义齿不稳定,被及早发现和及时处理可避免螺丝折断及更严重的并发症。而多植体联合支持种植义齿内单个修复螺丝松动时,其余螺丝协同作用仍可保持义齿稳定,致使异常的螺丝难以被及时发现,其余螺丝受力增大,侧向负荷加重,可能导致螺丝松动、折断,甚至种植体周围炎^[2-3]。因此,临床上及时准确地发现修复螺丝稳定性异常,并施加干预和处理,有利于提高种植义齿长期成功率。

叩击检测法也是最古老的无损检测方法之一。检测人员用硬物(如硬币、小锤等)叩击被测物体的表面,根据物体振动产生的声音来分辨被测物体是否存在缺陷^[4-5]。当物体中存在较大缺陷时,人耳听到的声音会比较沉闷,反之则声音清脆。近年来,随着各种传感器、麦克风等设备的引入,检测过程

中的振动信号、声音信号可转变为电信号,检测准确率大大提高。声振特征分析基于振动声学的基础理论而衍生,指在外界应力激发下,被测物体产生机械振动,从而发出声波,通过对该声振信号的检测,判断被测物体是否存在缺陷^[6-7]。2007年,White等^[8]通过自制样本,在全自由和全固定两种边界条件下进行叩击实验,通过对比两种不同状态下的频响曲线发现:振动信号对边界条件非常敏感,缺陷的存在使结构刚度下降从而导致自然频率下降。2022年,有学者通过叩击试验发现,不同缺陷螺栓声振信号的频谱图中特征频率也存在差异,且与螺栓的缺陷程度密切相关,因此提出利用振动声学的方法对螺栓的裂纹缺陷进行检测^[9]。叩诊是常用的口腔非侵入性检查方法,采用平头金属器械如口镜末端叩击牙齿,根据患者的反应和叩击声音确定根尖部或牙周组织有无炎症。还有通过口镜叩

击种植义齿,根据声音初步判断种植体是否松动。但由于人耳分辨能力有限,很少看到将其用于修复螺丝稳定性分析的文献报道。

目前,种植义齿修复螺丝稳定性评估主要依赖临床经验,其灵敏度低,需要开放螺丝通道后才能确认修复螺丝是否稳定性下降甚至丧失而松动。现有的关于修复螺丝松动检测的研究较少,涉及的操作费时费力,必须拆除义齿组件才能进行,而有些患者对于反复去除螺丝孔封闭材料存在抗拒心理^[10-11]。为此,本课题组前期设计并构建了基于叩诊的种植义齿声振特征分析系统,提出共振频率可作为多植体联合支持固定桥中修复螺丝稳定性相关的数字化标记^[12]。

口腔环境是临床评价种植义齿修复螺丝稳定性的应用场景,唾液和共鸣是口腔环境里不可避免的影响因素,尤其是共鸣作为一个重要的声学现象,对声振特征分析效果是否有影响?解决这一问题确定修复螺丝稳定性分析系统能否应用于临床不可或缺的环节。为此,本研究以修复下颌牙列缺失的6个种植体联合支持螺丝固位义齿为模型,在人工唾液与硅胶仿头模联合模拟的口腔环境内进行种植义齿声振特征分析,评价口腔环境对种植义齿修复螺丝稳定性分析效果的影响。本研究提出如下假说:人工唾液与硅胶仿头模联合模拟的口腔环境不会对应用共振频率分析种植义齿修复螺丝稳定性的效果产生影响。

材料与方法

一、实验分组方法

1. 对照组:选取固定种植修复下颌牙列缺失的装有Uni基台代型(Astra,瑞典)的石膏模型,按照常规程序制作螺丝固位式切削钛支架固定烤瓷桥,并将其通过修复螺丝(Astra,瑞典)固定在石膏模型上,再将石膏模型固定在半可调节颌架(AmannGirrbach,德国)上,6个修复螺丝从左至右分别编号为A~F(图1)。

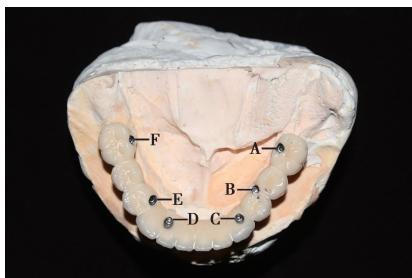


图1 室温下的带螺丝固位最终修复体的体外模型(对照组) A~F:修复螺丝从左至右编号。

2. 实验组:将体外实验模型放置在硅胶仿头模头套内,模拟口内共鸣腔环境,使用滴管抽取人工唾液(CF-002,广州科恩科技有限公司),滴加在头套内面和种植义齿上,并均匀涂抹(图2)。



图2 将对照组模型放置于仿头模内并滴加人工唾液(实验组)

二、修复螺丝预紧扭矩调整

使用数显扭力扳手(SDE-05BN;Wiztank,中国台湾省,5~50 N·cm)配合H1.3六角批头,调整实验模型中修复螺丝的预紧扭矩,形成与修复螺丝稳定性相关联的参数矩阵:按照厂家推荐将扭矩15 N·cm定义为修复螺丝完全预紧状态,在扭矩5~15 N·cm每间隔1 N·cm为1组,每个修复螺丝共12组。为避免修复螺丝回弹造成的预紧扭矩下降,初次预紧10 min后将修复螺丝再次拧紧至预设扭矩。在实验过程中,被测修复螺丝之外的其余5个修复螺丝的扭矩均为15 N·cm。

三、振动激发装置

振动激发装置主要结构包括握持柄和激发杆,握持柄内部装载供电系统和电源开关。激发杆内置静音马达,头部有1个突起为激发头,用于叩击种植固定义齿唇颊面。激发杆与握持柄的连接由固定轴和标准轴承配合构成,保证激发杆仅有固定轴转动唯一自由度。振动激发方式为摆动式,即接通电源后静音马达带动激发杆摆动,使激发头持续叩击义齿,激发杆的反向回弹幅度由金属轴限制,因此在义齿表面反复稳定地叩击以激发振动。

四、声振信号采集与处理

1. 声振信号采集:振动激发前,将贴片型拾音器(Schaller,德国)固定在种植固定义齿表面,拾音器放置在末端磨牙的咬合面并以牙龈封闭剂(佳洁蓝,上海丹洋医疗器械有限公司)固定(图3A)。拾音器通过USB声卡(US205,深圳绿联科技股份有限公司)连接电脑,配合Adobe Audition 2020(Adobe,美国)软件完成信号采集。在相对安静环境下,分别

对实验组和对照组的每个修复螺丝在12种预紧扭矩情况下各进行10次连续激发,每次时长超过10 s,截取中间10 s的信号,以wav格式保存。每个位点共采集120次,6个修复螺丝位点共720次。振动激发装置叩击的位点为被测修复螺丝对应的义齿唇颊侧,激发频率约为50次/s,激发力度经薄膜式压力传感器(FlexiforceA201, Tekscan, 美国)测量确定为0.20 N。采集通道数为2。

2. 声振信号处理:使用MATLAB(version R2018a)提取上述声振信号的时频特征,具体步骤如下:对声振信号进行分帧加窗处理,窗函数为汉明窗(Hamming window),帧长设置为5 000,帧叠为0.5(图3B~3C)。然后使用“specgram”函数进行短时傅里叶变换,以时频图的形式直观地反映声振信号的时频特征变化。

3. 归一化处理:计算对照组与实验组各修复螺

丝在各扭矩下的共振频率并进行归一化处理,具体方法如下:每个信号在分帧加窗后生成191个窗口,每10个窗口提取1个共振频率,再将19个共振频率进行算术平均为1个共振频率,上述过程在每个位点同一扭矩下重复10次。然后以各修复螺丝扭矩15 N·cm时的共振频率为基线,对各修复螺丝12种扭矩情况下的共振频率进行归一化。

五、统计学处理方法

计算对照组与实验组所有修复螺丝扭矩为15 N·cm时相应共振频率的变异系数。采用统计软件Medcalc(version 20.022)进行Bland-Altman分析,评估实验组和对照组模拟口内环境和体外环境共振频率的一致性,显著性水平为95%($P < 0.05$)。采用统计软件SPSS 26.0对每个修复螺丝扭矩参数矩阵的共振频率进行Pearson相关性分析,并计算相关系数 r ,显著性水平设置为0.05。

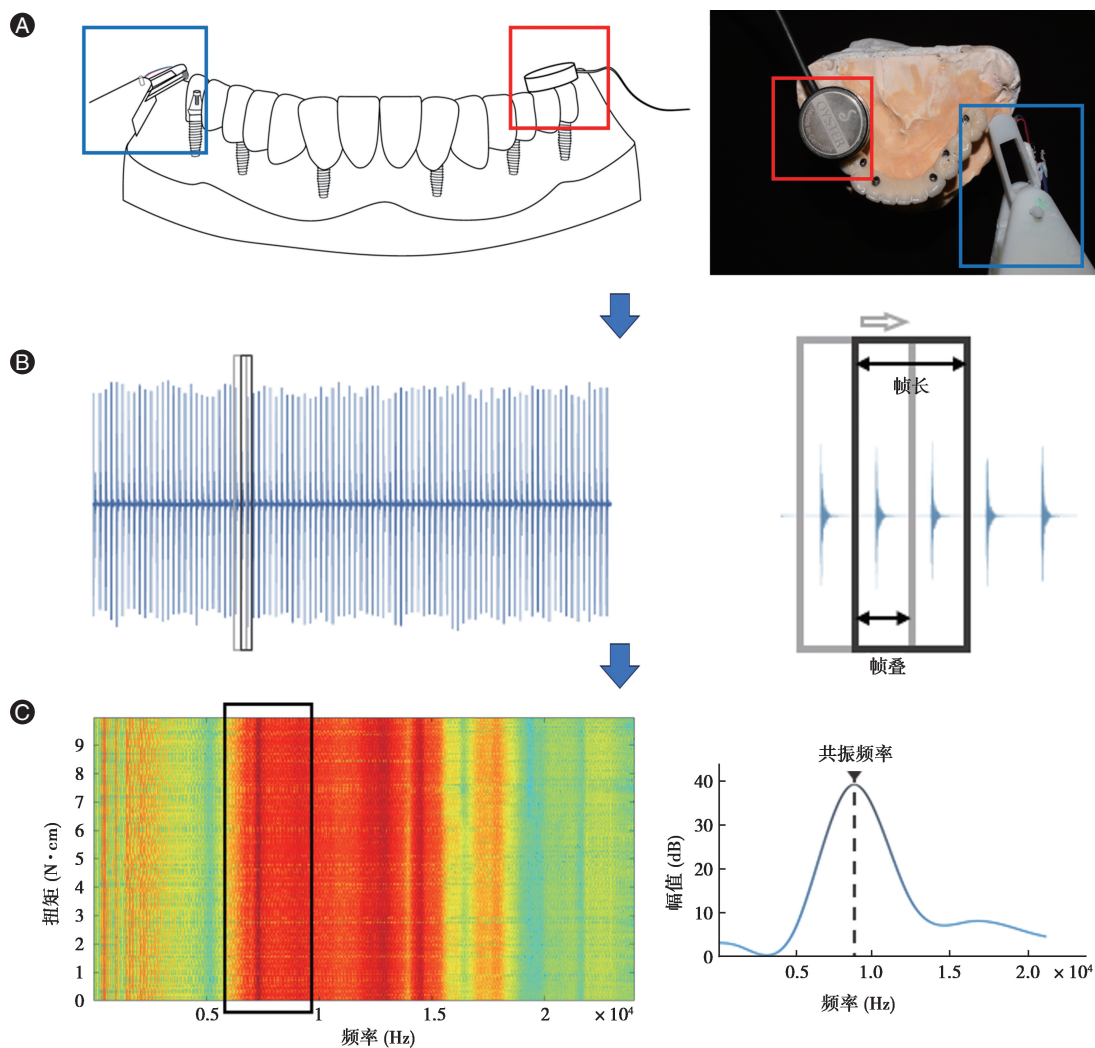


图3 声振信号采集及处理流程图 A:信号采集示意图(左)和实物图(右),蓝色方框为振动激发装置,红色方框为信号采集装置;B:分帧加窗示意图,右图为左图黑色方框放大图;C:短时快速傅里叶变换所输出的时频图,右图为左图黑色方框中所选取频带对应的能量峰值示意图。

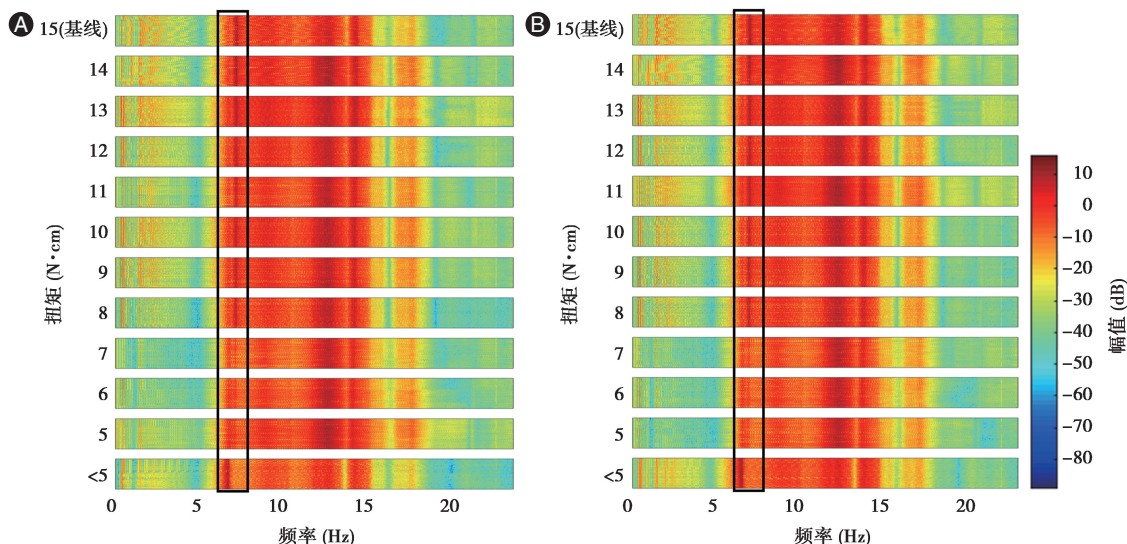


图4 修复螺丝A在不同扭矩情况下的声振信号时频图 A:对照组;B:实验组;黑色方框为具有特征的能量集中区域。

结 果

一、时频图

实验组与对照组的声振信号经傅里叶变换后所输出的时频图结果显示,两组的修复螺丝在7~9 kHz频带均含有能量集中区域,并在此区域内出现共振峰。相较于15 N·cm,在<5 N·cm和5~14 N·cm情况下共振频率均发生左移(图4)。

二、修复螺丝在15 N·cm时的共振频率及变异系数

声振信号经短时傅里叶变换后得出实验组各修复螺丝在15 N·cm时共振频率介于(7 329±8)~(8 400±8) Hz,变异系数为0.001~0.002。对照组各修复螺丝在15 N·cm时共振频率介于(7 329±6)~(8 463±11) Hz,变异系数为0.000 8~0.002(表1)。

表1 实验组和对照组A~F修复螺丝15 N·cm的共振频率及变异系数

修复螺丝	次数	实验组		对照组	
		共振频率 (Hz, $\bar{x} \pm s$)	变异 系数	共振频率 (Hz, $\bar{x} \pm s$)	变异 系数
A	10	7 329±8	0.001	7 329±6	0.000 8
B	10	7 340±10	0.001	7 340±12	0.002
C	10	7 374±9	0.001	7 375±9	0.001
D	10	8 284±11	0.001	8 284±11	0.001
E	10	8 465±14	0.002	8 463±11	0.001
F	10	8 400±8	0.001	8 404±11	0.001

三、Bland-Altman 一致性分析结果

一致性分析结果如图5所示,只有5.56%(4/72)的共振频率差值落在95%一致性界限以外。根据

表2所示,对照组归一化后的共振频率均值范围为0.585~0.881,实验组归一化后的共振频率均值范围为0.569~0.892,两组间共振频率差值的绝对值为0.001~0.016,共振频率相差的幅度较小,且一致性分析结果显示共振频率差异无统计学意义($P>0.05$),证实两种检测环境下分析获得的共振频率具有较高的一致性。

四、Pearson 相关性分析结果

相关性分析结果显示,在不同检测环境下各修复螺丝扭矩参数矩阵均与共振频率呈线性正相关($P<0.001$),共振频率随着扭矩值增大而显著升高,皮尔森相关性系数为0.483~0.931(图6)。不同检测环境下相关系数的差值为0.003~0.037。

讨 论

本研究探讨了口腔环境对共振频率分析修复螺丝稳定性的影响,其结果支持如下假说:人工唾液与硅胶仿头模联合模拟的口腔环境不会对应用共振频率分析修复螺丝稳定性的效果产生影响。

一、共振频率分析法检测修复螺丝稳定性的力学机制

2018年,Miyashita等^[11]采用共振频率分析法测量种植义齿基台螺丝稳定性,其理论依据是:各种原因导致的螺丝稳定性下降会削弱义齿抗振能力,随着螺丝稳定性下降,共振频率值也随之下落。正常情况下,预紧修复螺丝通过轴向夹紧使基台与修复体形成刚性连接。当修复体受到侧向外力时,其整体结构的振动会引发修复体、基台及修复螺丝等

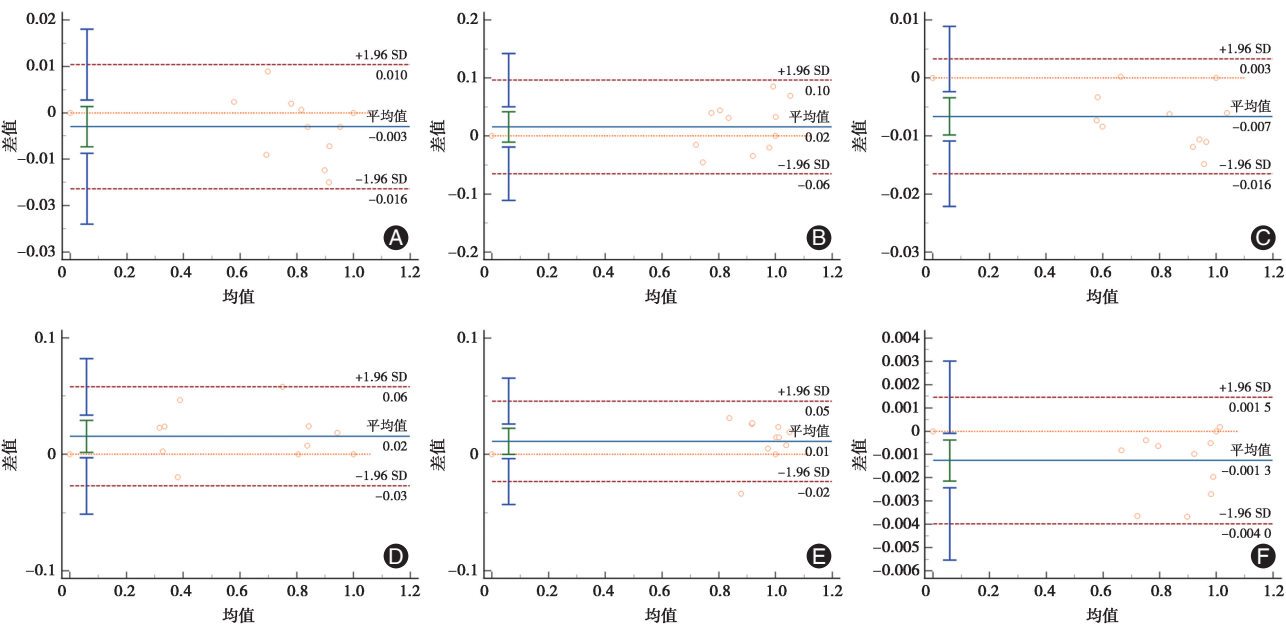


图5 修复螺丝在不同检测环境下分析获得的共振频率的Bland-Altman图 A~F:分别为修复螺丝A~F。

表2 修复螺丝A~F在不同检测环境下分析获得的共振频率的一致性分析结果

变量/指标	A	B	C	D	E	F
有效样本量	12	12	12	12	12	12
对照组共振频率均值	0.758	0.810	0.760	0.585	0.881	0.810
实验组共振频率均值	0.755	0.826	0.753	0.569	0.892	0.809
共振频率差值均值	-0.003	0.016	-0.007	0.015	0.011	-0.001
共振频率差值标准差	0.007	0.041	0.005	0.022	0.018	0.001
共振频率差值均值(95% CI)	-0.007~0.001	-0.010~0.041	-0.010~-0.003	0.002~0.029	0.001~0.023	-0.002~0.000
共振频率差值(95% CI)	-0.025~0.009	-0.060~0.137	-0.019~0.002	-0.040~0.054	-0.030~0.055	-0.004~0.002
t值	-1.054	0.859	-1.816	0.335	0.671	-0.618
P值	0.158	0.214	0.099	0.314	0.487	0.550
CR值	-0.008	0.038	-0.009	0.007	0.013	-0.001

结合界面的摩擦振动,从而激发特征性的声学信号。当修复螺丝稳定性降低乃至松动时,界面接触刚度下降将导致声振信号特征也随之发生改变。基于上述力学机制,本课题组前期研究通过基于叩诊的种植义齿声振特征分析系统,探讨了种植义齿共振频率与修复螺丝扭矩的关联性。研究发现,当修复螺丝扭矩从15 N·cm逐步降低时,义齿的共振频率呈连续性下降趋势。特别在修复螺丝扭矩值低于5 N·cm临界阈值时,系统共振频率发生陡降,提示修复螺丝发生松动。这表明该检测方法不仅可以定性,也可以定量检测多植体联合支持固定桥中单个修复螺丝的稳定性,且具有灵敏的响应特性,证实共振频率可作为螺丝固定修复体中修复螺丝松动的早期监测指标。为了进一步分析口腔环境对种植义齿稳定性声振共振频率分析效果的影

响,本课题组仍以6个种植体联合支持螺丝固位义齿为研究模型,基于以下因素考虑:这类模型中的修复螺丝,分布于牙列的前牙、磨牙和前磨牙等不同区域,口腔内不同位置的共鸣作用大小不同,利于对所处位置对声振特征分析的影响做全面研究。

二、口腔模拟环境的设计

口腔内由于唾液的分泌长期处于湿润状态,唾液中的各种无机离子和有机分子使其具有一定的润湿性和黏附性,无论是天然牙抑或是修复体在进行检查时表面难免存在唾液的黏附。为了在体外获得类似的口内情况,人工唾液已被用于体外各种实验性研究。但根据研究的目的所需要的唾液性质并不一致,腐蚀性研究需要考虑唾液的pH^[13],摩擦性能研究需要考虑唾液的润滑性^[14],而本研究主要考虑唾液润湿性的影响,因此选用ISO/TR10271

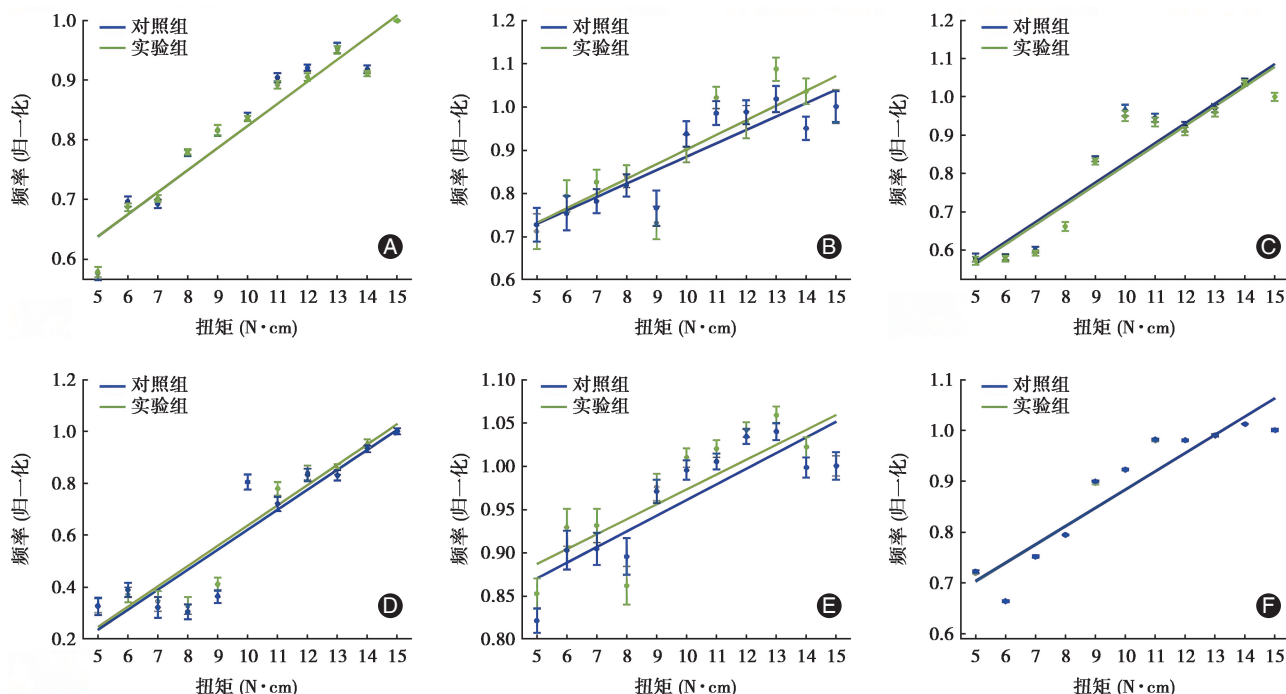


图6 不同检测环境下修复螺丝的扭矩与共振频率的相关性分析结果 A~F:分别为修复螺丝A~F。

标准的人工唾液,其水分含量约为98%,与正常唾液水分含量相近,更接近声振特征分析的应用环境,能为临床提供更可靠的参考数据。其次,口腔是个共鸣腔,而共鸣腔是声学研究不可忽略的影响因素。临床进行口腔检查时,患者通常处于张口状态,此时口腔从全封闭腔变为半封闭腔,为了更好地分析口腔环境对声振特征分析效果的影响,本研究采用仿头模头套内层湿润与人工唾液联合模拟口腔环境。

三、口腔环境对共振频率检测的影响

本研究结果显示,当修复螺丝A~F均处于紧固状态或完全松动状态时,激发各螺丝所得到的共振频率值并不一致,这可能是由于各种因素对共振频率产生影响的结果,如:修复螺丝的位置、激发位置与修复螺丝间相对距离或修复体的三维结构等。为使各修复螺丝间各扭矩下的共振频率具有可比性,需对不同修复螺丝不同扭矩对应的共振频率进行归一化处理,即将不同数据的范围缩放到相同的标准范围内,以避免因数据大小差异导致的识别偏差,然后再做进一步分析。本研究中各修复螺丝扭矩为15 N·cm时的共振频率是归一化处理的基线,其稳定性对于结果处理分析至关重要。结果显示,无论是对照组还是实验组,虽然每个修复螺丝对应的共振频率并不相同,但非常稳定,变异系数不超

过0.002。另外,从时频图的结果可以直观看出,实验组与对照组结果一致,共振频率均随着扭矩值减小而降低。Bland-Altman统计结果表明,实验组与对照组中修复螺丝A~F在各扭矩下对应的共振频率差异均无统计学意义,即两组的分析结果具有一致性。进一步的皮尔森相关性分析结果显示,实验组和对照组的修复螺丝扭矩值与共振频率的线性相关程度也高度一致。上述结果表明,唾液及共鸣腔的存在未对振动激发和声振特性产生影响。究其原因,首先共鸣腔里的声音传导介质为空气柱,对于借助气体传导采集信号的设备如麦克风等影响较大。使用贴片型拾音器与被测物体直接接触,当被测物体振动期间可引起拾音器内部压电陶瓷的形变产生压电效应,导致电压改变,然后通过插值解析,按比例获取振动信号^[15]。即修复体被激发振动后产生响应的声振信号由修复体固态传导,因此受共鸣腔影响很小。其次,本研究中振动激发方案为摆动式,激发频率为50次/s,每次叩击时和义齿表面接触时间很短,加上修复体表面唾液的量很薄,黏附力低,不足以影响振动激发和信号采集。

四、局限性和临床展望

必须指出,唾液及共鸣腔仅是口腔环境内的两个方面,口腔包含着更多更复杂的结构,如植体周围骨质或植体周围软组织,这些因素是否会影响基于

共振频率分析修复螺丝稳定性的效果,还需进一步探究。此外,尽管本研究结果显示唾液存在并未对分析效果产生影响,但还是应在具体操作时保持义齿表面尽可能干燥,保持音频信号采集条件一致。

综上所述,湿润和共鸣的口腔环境未对基于叩诊的种植义齿声振特征分析产生不利影响,以共振频率反映修复螺丝稳定性具有良好的临床应用前景。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 郭珈而:文章撰写、文章修改、数据统计分析;王晓露:文章审阅和修改、作图;刘志鑫:音频采集、数据整理、数据统计分析;周建英:研究指导、文章审阅、经费支持;王琳:研究指导、文章审阅和修改、经费支持

参 考 文 献

- [1] Chen J, Guo J, Yang L, et al. Effect of different implant angulations on the biomechanical performance of prosthetic screws in two implant-supported, screw-retained prostheses: A numerical and experimental study[J]. J Prosthet Dent, 2023, 130(2):240.e1-240.e10. DOI:10.1016/j.prosdent.2023.06.004.
- [2] Stavropoulos A, Bertl K, Eren S, et al. Mechanical and biological complications after implantoplasty: A systematic review [J]. Clin Oral Implants Res, 2019, 30(9): 833-848. DOI: 10.1111/clr.13499.
- [3] Papaspyridakos P, Bordin TB, Kim YJ, et al. Technical complications and prosthesis survival rates with implant-supported fixed complete dental prostheses: A retrospective study with 1- to 12-year follow-up[J]. J Prosthodont, 2020, 29(1):3-11. DOI:10.1111/jopr.13119.
- [4] 李瑾,行鸿彦,吴叶丽,等. 基于敲击声音信号的墙体内管道探测方法[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(2): 1-6. DOI: 10.19652/j.cnki.femt.2103310.
- [5] 郭冠华,林俊明,任吉林,等. 声振检测方法的发展[J]. 无损检测, 2011, 33(2):35-41.
- [6] Lu SL, Wang XX, He QB, et al. Fault diagnosis of motor bearing with speed fluctuation via angular resampling of transient sound signals[J]. J Sound Vibration, 2016, 385: 16-32. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.09.012.
- [7] Hassani S, Mousavi M, Gandomi AH. Structural health monitoring in composite structures: A comprehensive review[J]. Sensors (Basel), 2021, 22(1):153. DOI:10.3390/s22010153.
- [8] White C, Whittingham B, Li H, et al. Health assessment of bonded composite repairs with frequency response techniques [J]. Smart Structures, Devices, and Systems III, 2007: 6414. DOI:10.1117/12.695642.
- [9] 刘永超. 基于振动声学的螺栓疲劳开裂检测方法[J]. 制造技术与机床, 2022(8):142-148. DOI:10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.08.022.
- [10] Hanses G, Smedberg JI, Nilner K. Analysis of a device for assessment of abutment and prosthesis screw loosening in oral implants [J]. Clin Oral Implants Res, 2002, 13(6): 666-670. DOI:10.1034/j.1600-0501.2002.130614.x.
- [11] Miyashita M, Ogawa T, Naito H, et al. Evaluation of implant screw loosening by resonance frequency analysis with triaxial piezoelectric pick-up: *In vitro* model and *in vivo* animal study[J]. Clin Oral Investig, 2018, 22(5): 2129-2134. DOI: 10.1007/s00784-018-2467-1.
- [12] Guo J, Wang X, Liu Z, et al. Acoustic resonance frequency analysis for evaluating prosthetic screw stability in splinted implant-supported fixed dental prostheses: An *in vitro* study[J]. J Prosthet Dent, 2025, 133(2): 542.e1-542.e9. DOI:10.1016/j.prosdent.2024.10.028.
- [13] 杨西荣,胡佳乔. 纯钛、纯锆在模拟口腔唾液中的腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(18):69-73+78. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20173324.
- [14] Reredy SK, Cao AC, Blackwell B, et al. Rheology of saliva in health and disease[J]. Biorheology, 2023, 59(1-2): 19-27. DOI: 10.3233/bir-210014.
- [15] de Souza Marinho D, Rocha Pinto F, Baptista ER. Piezoelectric effect as an energy generator: A desribal historic of its performance [J]. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 2019, 6(11): 228-232. DOI: 10.22161/ijaers.611.35.

(收稿日期:2024-11-30)

(本文编辑:王嫚)