

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.019

超声弯曲工具头的动态特性仿真与实验研究

谢佼龙¹, 彭伟¹, 姚春燕¹, 袁振飞²

(1. 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014;
2. 衢州人民医院, 浙江 衢州 324000)

摘 要:牙种植超声工具利用弯曲工具头能够制备异型种植窝孔,为了研究工具头弯曲角度对位移响应的影响,利用有限元软件 Abaqus 对弯曲工具头进行动态仿真,得到不同弯曲角度工具头的位移响应,并通过实验验证有限元分析结果。验证实验表明,有限元分析结果与实验结果基本保持一致,为具有弯曲工具头的牙种植超声工具的设计提供了方法和依据。

关 键 词:牙种植;超声工具;弯曲工具头;有限元

中图分类号:TH113.1;TG663

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)02-0073-05

Simulation and Experimental Research on Dynamic Characteristics of Ultrasonic Bending Inserts

XIE Jiaolong¹, PENG Wei¹, YAO Chunyan¹, YUAN Zhenfei²

(1. Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China;
2. Quzhou People's Hospital, Quzhou, Zhejiang 324000, China)

Abstract: With the help of bending inserts, ultrasonic tools used in dental implantology can make holes for implants. In order to analyze effects of bending angles on displacement response of inserts, the finite element analysis software Abaqus was used to simulate three inserts with different bending angles. And then the results of the finite element analysis through experiments was demonstrated. The research shows that the FEA results are in good consistent with the experiment results, and it provides methods and basis for the design of ultrasonic planting tools with bending inserts.

Key words: dental implant; ultrasonic tools; bending inserts; finite element analysis (FEA)

牙种植超声工具能够将工具头的异型轮廓复制到病人的颌骨中,完成异型种植窝孔的制备,满足多牙根异型种植体的备孔要求。由于人体口腔的几何构造非常特殊,在工具头的结构设计过程中需要综合考虑患者的开口度、邻牙的干涉等问题,因此需要使用弯曲的工具头。目前,国内外学者主要对超声振动系统中的超声电源、换能器和变幅杆等核心部件有大量的研究。刘井权等^[1]利用有限元分析超声工具头几何尺寸和材料属性对变幅杆与工具头组合体的固有频率、振幅放大系数的影响;朱武^[2]利用四端网络法推导圆锥过渡阶梯形变幅杆的频率和振速比方程,得到工作频率为 20 kHz 的变幅杆;朱寅^[3]利用波动理论计算超声指数形变幅杆的振幅放大系数、节点及应力极大点等参

数,符合有限元分析结果;陈颖等^[4]利用有限元软件 ANSYS 对超声手术刀的振动系统进行模态分析和谐波响应分析,得到刀头的振幅、放大系数等参数,并分析了电压载荷、压电片数以及阻尼对刀头振幅的影响。目前还没有文献研究工具头弯曲角度对位移响应的影响,文中结合波动理论计算结果,利用有限元软件 Abaqus 分析具有不同弯曲角度工具头的位移响应,并通过实验验证有限元分析结果,为具有弯曲工具头的牙种植超声工具的设计提供方法和依据^[5]。

1 变幅杆和弯曲工具头尺寸参数

超声工具包括超声波发生器、换能器、变幅杆以及工具头 4 个部分(见图 1),其工作原理是由超声波发生器产生超声频电信号,通过换能器将超声频电信号

收稿日期:2013-09-15;修回日期:2013-09-22

基金项目:浙江省科技厅项目(2013C31113)

作者简介:谢佼龙(1988),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究方向为拟自然牙多牙根超声种植工具。E-mail: xiejiaolong36@163.com

转化为高频机械振动,并利用变幅杆的聚能作用将换能器输出端几个微米的振幅放大,使得工具头的振幅达到几十甚至上百微米,满足实际应用的要求^[6]。文中利用超声设备 NSK-US-15CBS,研究了工具头弯曲角度对位移响应的影响。

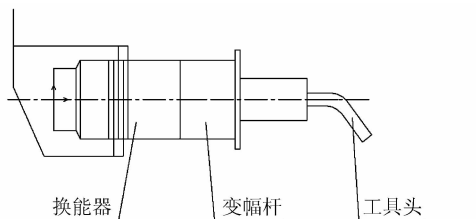


图1 超声工具示意图

Figure 1 Sketch map of ultrasonic tools

1.1 变幅杆尺寸参数

超声设备 NSK-US-15CBS 工作频率为 39.5 kHz,采用阶梯形变幅杆,变幅杆材料为 45 号钢,表 1 是 45 号钢的材料参数^[7]。纵振变幅杆采用半波长设计^[8],相关参数见表 2。

表 1 45 号钢材料参数

Table 1 Material property of 45 steel

材料	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E / GPa	声速 C / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比
45 号钢	7 800	210	5 170	0.28

表 2 阶梯形变幅杆参数

Table 2 Parameters of the stepped horn

频率 f/kHz	大端直径 D/mm	小端直径 d/mm	半波谐振 长度 L/mm	位移节点 x_0	放大系数 M_p
39.5	15	10	64.5	中点	2.25

1.2 弯曲工具头尺寸参数

为了和纵向振动的变幅杆匹配使用,使得振动系能够正常工作,弯曲工具头在工作频率 39.5 kHz 附近具有弯曲振型。等截面匀质细长杆的弯曲振动运动方程为^[9]

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -m \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}, m^2 = \frac{EJ}{A\rho}$$

式中: J 为截面惯性矩, E 为材料弹性模量, A 为横截面积, ρ 为材料密度。

结合实验设备,采用长为 1 mm,宽为 2 mm 的矩形等截面体,工具头材料为 45 号钢。根据等截面均质梁的弯曲振动理论计算工具头前三阶弯曲振型谐振长度,相关参数见表 3。文中采用二阶弯曲振型,长度为 27.1 mm。

表 3 弯曲工具头参数

Table 3 Parameters of bending inserts

频率 f / kHz	截面长 $\times$ 宽/ mm $\times$ mm	截面惯性矩 J/mm^4	前三阶谐振长度/mm		
			$i=1$	$i=2$	$i=3$
39.5	1 $\times$ 2	0.66	16.3	27.1	38.0

1.3 阶梯形变幅杆和弯曲工具头三维模型

在 Abaqus 中建立变幅杆和弯曲工具头的三维模型如图 2 所示,其中工具头弯曲角度分别为 90°,120°和 145°用于对比分析,同时建立局部坐标系便于结果讨论。

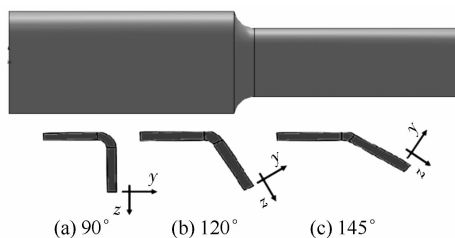


图 2 阶梯形变幅杆和不同弯曲角度的工具头示意图

Figure 2 Sketch map of stepped horn and inserts with different bending angles

2 有限元分析

2.1 模态分析

在有限元分析软件 Abaqus 中,选择 Solid45 单元定义材料属性,并用四面体单元划分网格,采用 Lanczos 方法提取装配体前 30 阶模态,工具头和变幅杆在频率 39.5 kHz 附近的固有振型如图 3 所示。

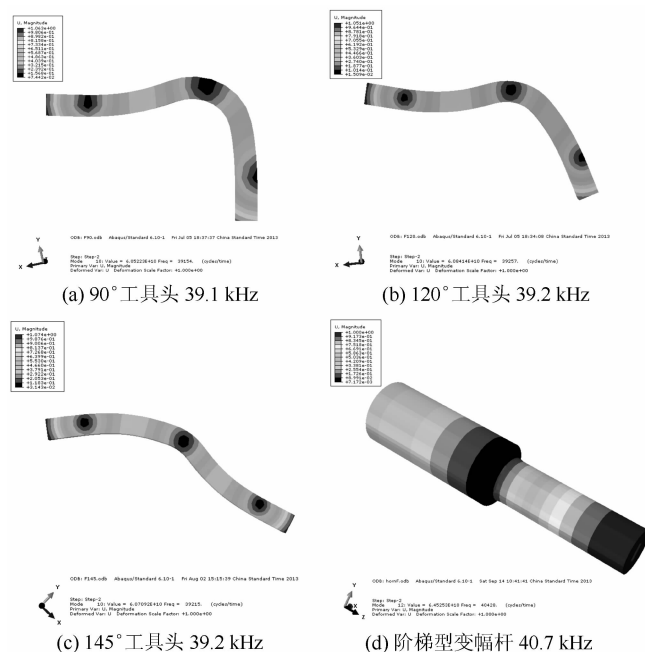


图 3 不同角度的工具头和变幅杆的模态振型

Figure 3 Mode shapes of inserts with different angles and horn

2.2 谐响应分析

在 Abaqus 中装配变幅杆和工具头模型,绑定接触表面,在模态分析的基础上进行谐响应分析:变幅杆大端面施加 1 MPa 压强载荷,激励频率范围为 37 ~ 40 kHz,阻尼系数为 0.2%,工具头末端的频率位移响应如图 4 所示。

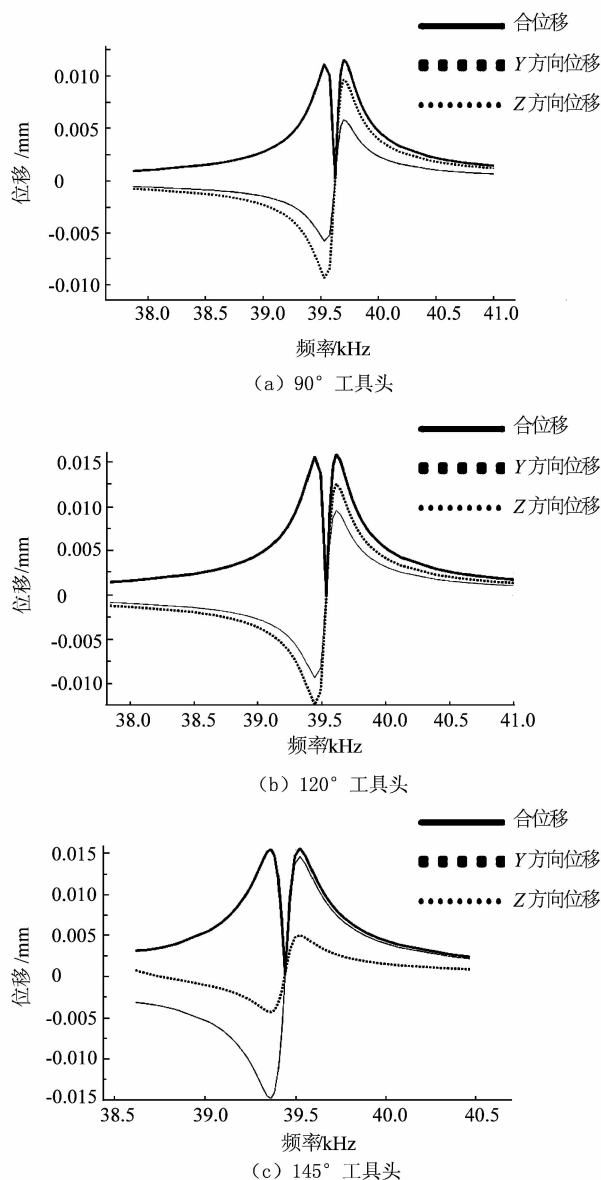


图 4 工具头频率位移响应

Figure 4 Frequency displacement response of inserts

由图 4 可知,工具头末端的位移峰值响应频率接近 39.5 kHz,说明在工作频率附近能够发生共振,位移峰值列于表 4。由表 4 可知:90°工具头的合位移最小,Y 方向的位移大于 Z 方向;120°工具头合位移最大,Z 方向的位移略大于 Y 方向;145°工具头的合位移略小于 120°,Z 方向的位移远大于 Y 方向。分析结果

表明:工具头弯曲角度越大 Z 方向的位移越大(见图 5),同时在合位移中占有的比重也越大,其中 120°工具头 Y 方向和 Z 方向的位移值比较接近。

表 4 工具头末端位移

Table 4 Displacement of the ends of inserts

工具头 角度/(°)	Y/ μm	Z/ μm	Y-Z 合 位移/ μm	驱动频率/ kHz
90	10.1	7.4	12.8	39.7
120	12.5	13.3	18.3	39.6
145	5.0	16.2	17.0	39.5

进一步研究可以发现,工具头在接近末端的位置都有一个 Y 方向位移为零的点如图 6 所示,说明虽然工具头弯曲角度不同,但是振动形式相似。

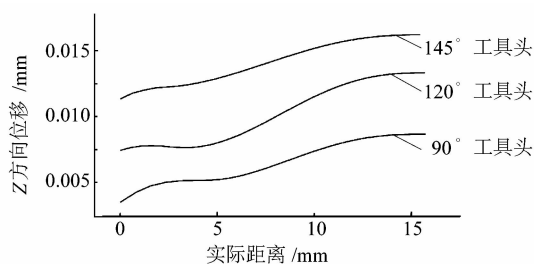


图 5 工具头 Z 方向的位移分布

Figure 5 Displacement distribution of inserts in Z direction

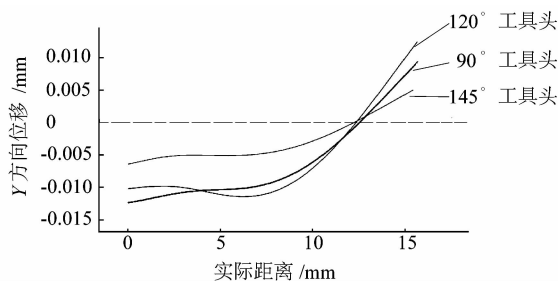


图 6 工具头 Y 方向的位移分布

Figure 6 Displacement distribution of inserts in Y direction

3 实验验证

超声设备 NSK-US-15CBS(见图 7)作为超声振动发生装置以及弯曲工具头的载体,同时利用高速摄影仪 VW-6000 显微功能测量振幅^[10],通过比较工具头测量点静止和振动时的图像,利用光斑的运动轨迹观察测量 Y-Z 平面振动幅值(如图 8 栅格大小 50 μm),拍摄曝光时间为 0.1 s。

结合 5 个位置的光斑轨迹,说明工具头的位移分布特征:①②③位置的位移方向与变幅杆小端面的纵向振动基本保持一致;④点位置振动方向发生转变,光



图7 超声实验设备

Figure 7 Ultrasonic device used for experiment

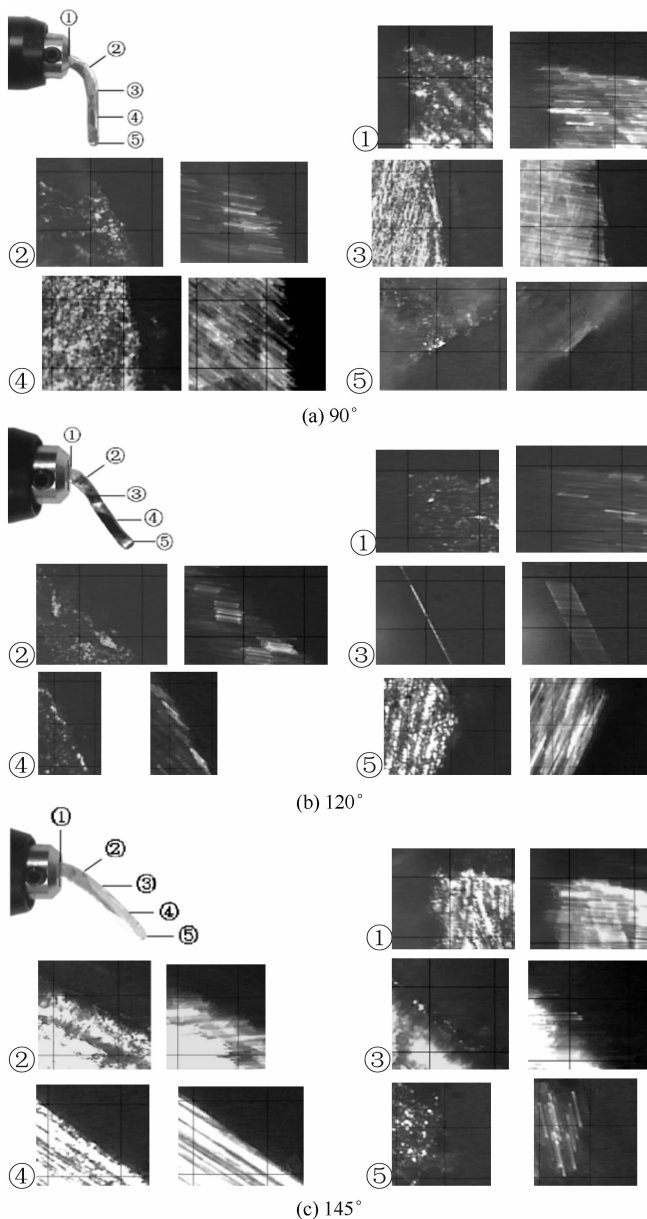


图8 不同弯曲角度工具头的振动轨迹图

Figure 8 Vibration locus images of inserts with different angles

斑轨迹平行于工具头轴向,④点位置即图6零点位置;末端⑤的位移方向由于工具头角度的不同有显著的差别,随着弯曲角度的增大工具头端面的位移方向与Z向的夹角越小,符合有限元分析结果。图9是实验测量值和有限元分析结果的比较。

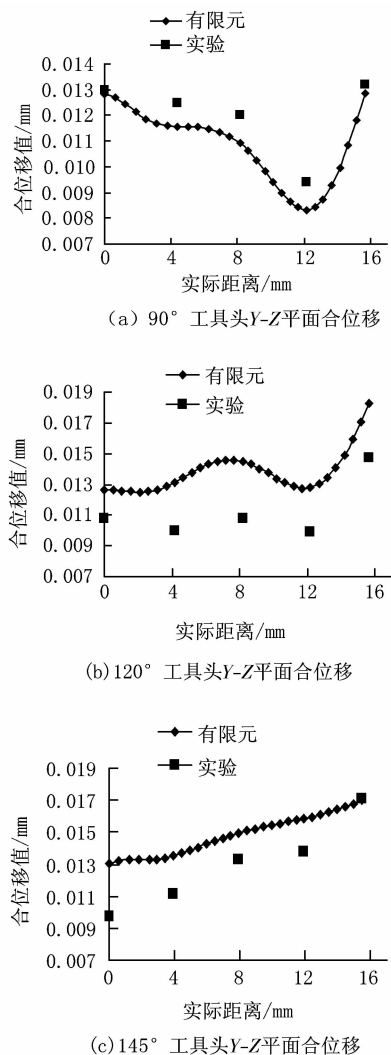


图9 不同弯曲角度工具头的位移分布

Figure 9 Displacement distribution of inserts with different bending angles

4 结论

利用波动理论和有限元分析,研究了工具头不同弯曲角度对位移分布的影响,并通过实验验证有限元分析结果,为具有弯曲工具头的牙种植工具的设计提供方法和依据,研究表明:

1) 实验获得的工具头的位移分布符合有限元分析结果,说明有限元分析方法能够用于牙种植超声工具的设计。

(下转第81页)