

文章编号:1004-7220(2018)05-0447-06

# 中耳结构动力响应对不同病理圆窗封闭的反馈

李秉泰, 姚文娟, 马钰栋

(上海大学土木工程系, 上海 201900)

**摘要:**目的 研究耳蜗圆窗病变对中耳结构力学行为的影响。方法 依据临床健康志愿者右耳 CT 扫描结果,将 CT 扫描数据数字化导入 PATRAN 软件进行人耳三维有限元模型重建,并应用 NASTRAN 软件进行流固耦合频率响应分析,通过数值模拟方法探讨中耳结构动力响应对内耳耳蜗圆窗病变的反馈。结果 硬化症导致的圆窗封闭比先天性圆窗封闭使镫骨振幅下降更多,最大达到 30.2 dB,且后者不会对镫骨振动速度产生明显影响。相位角方面,硬化症情况下镫骨和圆窗均最多产生 90°变化,且两者保持 180°差值;而先天性圆窗封闭情况下镫骨最大有 270°变化,同时圆窗相位角变化消失。结论 基于振幅、速度和相位角,镫骨动力行为会对先天性和硬化症导致的圆窗封闭形成不同的反馈表现,研究结果可为未来临床上诊断及修复圆窗病变提供理论支撑。

**关键词:**圆窗病变;中耳;动力响应;相位角;数值模拟

中图分类号: R 308.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.05.011

## Feedback of Dynamic Responses from the Middle Ear for Round Window Closure with Different Pathology

LI Bingtai, YAO Wenjuan, MA Yudong

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 201900, China)

**Abstract:** **Objective** To analyze the influence of round window lesion on dynamic responses from the middle ear. **Methods** Based on CT scan images of healthy human ear, the three-dimensional finite element model of human ear was rebuilt by PATRAN software, then NASTRAN software was applied to conduct coupled solid-fluid frequency response analysis. The feedback of round window lesion on dynamic response of the middle ear was investigated by numerical simulation. **Results** Round window closure caused by sclerosis led to more decline in amplitude of stapes than congenital round window closed, maximally can reach 30.2 dB, and the latter had no obvious influence on velocity of stapes. In term of phase angle, on condition of sclerosis, change of phase for stapes and round window reached 90° at most and kept a difference value of 180°. In contrast, on condition of congenital round window closed, change of phase for stapes reached 270° at most, meanwhile change of phase for round window disappeared. **Conclusions** The dynamic response of the middle ear showed different feedback to congenital and otosclerotic round window fixation based on amplitude, velocity and phase. The research findings provide the theoretical basis for diagnosing and fixing round window lesion in future.

**Key words:** round window lesion; middle ear; dynamic response; phase angle; numerical simulation

收稿日期:2017-09-21;修回日期:2017-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(11272200,11572186)

通信作者:姚文娟,教授,博士研究生导师, E-mail: wjyao@shu.edu.cn

耳聋的分类主要有以下几种:传导性耳聋、感音神经性耳聋、混合性耳聋、中枢性和功能性耳聋。其中,由于内耳破坏所致的感音神经性耳聋组成耳聋患者的大部分。感音神经性耳聋源于耳蜗、前庭蜗神经或中枢听觉系统的异常,其中尤以耳蜗的感音病变为主;其临床上的表现之一是圆窗的先天性以及硬化症导致的固定。

有关圆窗固定对听力的影响,已有部分国外学者开展了研究。Nageris等<sup>[1]</sup>利用沙鼠实验发现,圆窗封闭导致气导听力阈值的明显上升。Pappas等<sup>[2]</sup>和Linder等<sup>[3]</sup>先后通过CT成像和临床案例分析了硬化症下镫骨和圆窗固定的关联性,得出的结论均表明圆窗固定通常在不成功的镫骨切除术后的复诊中被怀疑从而被诊断出。在进行术前CT扫描时,圆窗壁龛的定位表现经常被放射科和临床医生忽视。Cai等<sup>[4]</sup>建议针对此类病变的诊断需要高分辨率的计算机CT扫描,同时配合手术中对圆窗壁龛进行检查。而打开闭锁的圆窗壁龛是一项极具挑战性的工作,常常导致不可恢复的听力损失,故在临床上有一定的风险。由以往研究结论可知,直接测试或诊断圆窗封闭的病变在临床上较为困难。鉴于此,本文建立全耳有限元数值模型,模拟计算由于圆窗病变引起的中耳结构动力学行为变化,通过中耳特定的异常信息反馈初步诊断内耳组织结构病变,研究结果为临床上诊断及修复圆窗病变提供理论支撑。

## 1 有限元模型

### 1.1 全耳有限元模型建立

使用复旦大学附属中山医院 GE lightspeed VCT 64 排螺旋 CT 机(扫描参数:准直 625 μm,球管旋转时间 0.4 s,重建层厚 0.625 mm,间隔 500 ~ 625 μm),对健康人耳进行 CT 扫描并获得图像。利用 SolidWork 2012 建立包括外耳道、中耳听骨链和螺旋耳蜗的全耳三维几何模型。其中,外耳道建模过程参考 Gan 等<sup>[5]</sup>的外耳道模型进行简化,保证其几何尺寸在基本与真实人耳结构相同的前提下,用规则直线代替耳道复杂曲线,而并不影响其力学传导性能。内耳建模方面参考文献[6-7]中的主动耳蜗模型,考虑到半规管为维持人体平衡器官并不参与声波传递遂将其忽略,形成由蜗

壳、基底膜、骨质螺旋板、圆窗、卵圆窗和充满淋巴液的前庭阶鼓阶组成的流固耦合螺旋耳蜗结构,前庭阶和鼓阶由位于两者间的骨质螺旋板和基底膜分隔为两个腔体。之后,导入 MSC. PATRAN 有限元软件中并对几何模型进行网格划分、材料属性、单元属性、工况和边界条件的设定。最后,利用配套的分析软件 MSC. NASTRAN 进行流-固耦合模态和频率响应分析,通过结果后处理提取数据生成有关曲线。全耳有限元模型网格划分情况如图 1 所示。

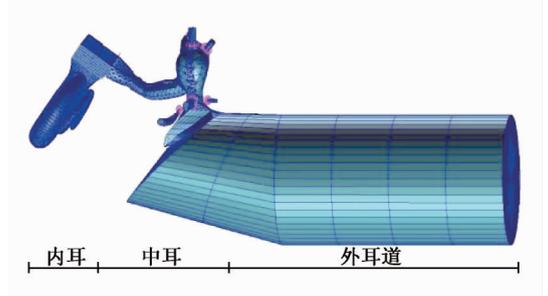


图1 含外耳道的全耳有限元模型  
Fig. 1 Finite element model of the human ear

有限元模型建立中,外耳道单元被定义为流体,由 3 150 个六面体单元构成,节点数量 3 608,鼓膜定义为二维膜单元,由 30 个三角形和 330 个四边形单元构成,节点数为 361。锤骨、砧骨、镫骨 3 块听小骨均为三维固体单元,分别由 2421、2742、592 个四面体单元构成。卵圆窗和圆窗被定义为二维膜结构,分别为 100、70 个四边形单元。耳蜗中淋巴液也被定义为流体。

### 1.2 控制方程

声固耦合和液固耦合的控制方程为:

$$\begin{bmatrix} [M_e] & [0] \\ [M^{fs}] & [M_e^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_e \\ \dot{p}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_e] & [0] \\ [0] & [C_e^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_e \\ \dot{p}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_e] & [K^{fs}] \\ [0] & [K_e^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_e \\ p_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_e \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $[M_e]$  为固体质量矩阵;  $[M_e^p]$  为流固耦合界面质量矩阵;  $[M_e^p]$  为声音质量矩阵;  $[C_e]$  为结构阻尼矩阵;  $[C_e^p]$  为声音阻尼矩阵;  $[K_e]$  为刚度矩阵;  $[K_e^p]$  为流体刚度矩阵;  $[K^{fs}]$  为流固耦合刚度矩阵;  $[R_e]$  为流固耦合界面过渡矩阵;  $u_e$  为位移矩阵;  $p_e$  为压力矩阵。

### 1.3 材料属性

本模型各部分材料属性参考文献[8], 泊松比均取 0.3, 结构阻尼系数取 0.6<sup>[9]</sup>, 流体的黏度为 1 mPa·s, 阻尼系数  $\beta = 0.1 \text{ mN}\cdot\text{s}/\text{m}^{[10]}$ 。

### 1.4 边界条件

鼓膜张肌、锤骨上悬韧带、锤骨前韧带、锤骨侧韧带、砧骨上悬韧带、砧骨后韧带一端与听骨链相连, 另一端连接于鼓室壁上, 有限元模型中设定韧带与鼓室壁相连的一端为固定约束, 节点各向位移为零。圆窗、卵圆窗外边缘限制其所在平面内的两个方向( $X$ 和 $Y$ 方向)的位移, 使其只可沿垂直方向( $Z$ 方向)移动。鼓膜环韧带外边缘与外耳道连接处为固定约束, 各向位移为 0。鼓膜、基底膜、骨质螺旋板以及前庭阶、鼓阶内壁为流固耦合界面。

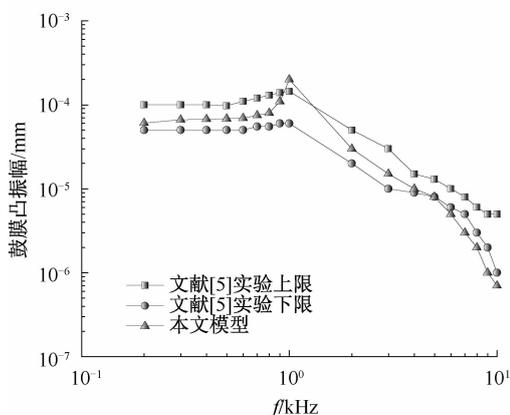


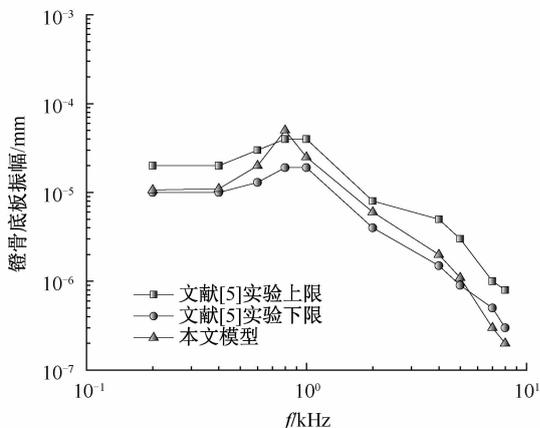
图2 振幅的有限元模型结果与文献[5]实验数据对比

Fig.2 Comparison of the amplitude between the FE model results and the experimental data of Ref. [5]

(a) Umbo, (b) Stapes footplate

## 2 有限元模型的验证

中耳结构部分验证方面, 在外耳道面上施加等效 90 dB (0.632 Pa) 声压, 进行频率响应分析计算。在 PATRAN 软件中结果后处理, 生成鼓膜和镫骨足板中心处位移频率响应曲线, 并与 Gan 等<sup>[5]</sup>的实验数据进行比较(见图2)。本模型计算得出的鼓膜和镫骨足板中心处位移频率响应曲线和实验所得的数据在趋势和数值上相近。在 0.1 ~ 0.9 kHz, 鼓膜中心处位移和镫骨足板位移频率响应曲线在实验数据的上下限之间, 在低频率段更加接近实验数据下限。在 1 kHz 附近分别到达曲线顶峰时均略微超过实验上限, 之后逐渐下降, 在 6 kHz 后稍稍偏离实验下限。



内耳结构部分验证方面, Stenfelt 等<sup>[11]</sup>和 Kim 等<sup>[12]</sup>对人耳颞骨进行了实验, 通过在外耳道施加 90 dB 声压级的声压激励, 得到了基底膜自底端向上端 12 mm 处位置的振幅与镫骨足板振幅之比以及基底膜相位与镫骨底板相位差值与频率的关系曲线。

基于以上实验, 在本文模型的外耳道面施加等效 90 dB 声压, 进行频率响应分析计算, 利用有限元软件数据后处理得到基底膜自底端向上端 12 mm 处位置振幅和镫骨足板中心处振幅的比值, 再利用瞬态响应分析得到两者相位差值, 并与 Stenfelt 等<sup>[11]</sup>和 Kim 等<sup>[12]</sup>获得的实验数据进行对比(见图3、4)。

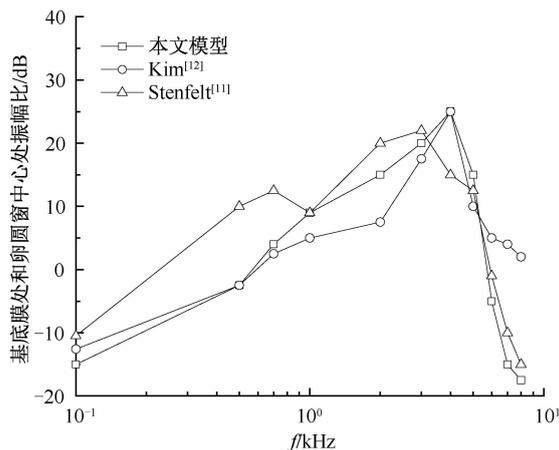


图3 基底膜处与卵圆窗中心振幅比

Fig.3 Amplitude ratio of basilar membrane and oval window

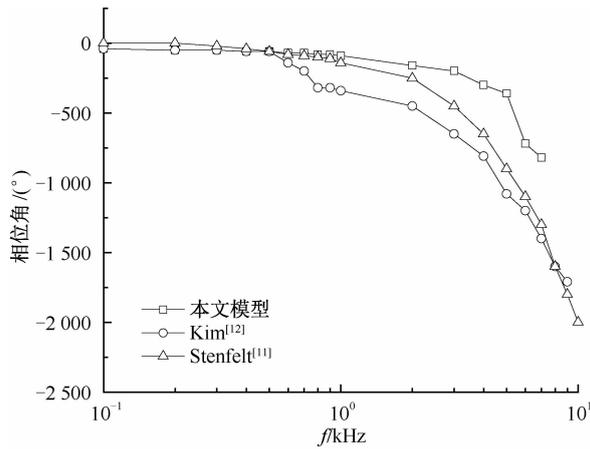


图4 基底膜与卵圆窗相位角差值  
Fig. 4 Phase angle difference between basilar membrane and oval window

由图3可知,本文模型得到的基底膜12 mm处与卵圆窗中心位移比响应曲线在0.1~0.5 kHz略低于Kim等<sup>[12]</sup>的实验数据;在0.5~4.0 kHz,介于Stenfelt等<sup>[11]</sup>和Kim等<sup>[12]</sup>实验曲线之间;在4~5 kHz,和Kim等<sup>[12]</sup>的曲线基本吻合;在5~8 kHz,和Stenfelt等<sup>[11]</sup>的曲线基本吻合。

由图4可知,在0.1~0.5 kHz,本文模型得到的相位角差值曲线稍高于Stenfelt等<sup>[11]</sup>和Kim等<sup>[12]</sup>的实验曲线;在0.5~5.0 kHz,模拟曲线介于Stenfelt等<sup>[11]</sup>和Kim等<sup>[12]</sup>的实验曲线之间;在5~10 kHz,模拟曲线与Stenfelt等<sup>[11]</sup>的实验曲线吻合较好。

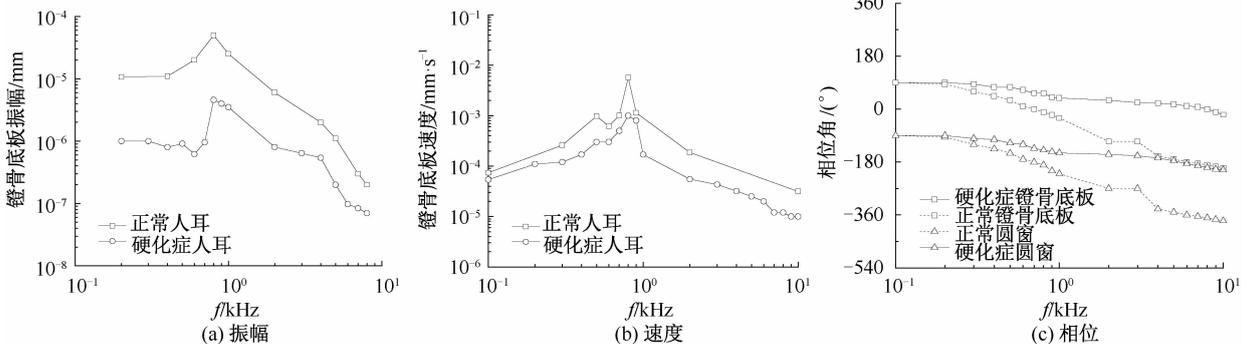


图5 圆窗和卵圆窗硬化时镫骨底板响应曲线(90 dB SPL)

Fig. 5 Curves of the stapes footplate with oval and round window influenced by sclerosis (a) Amplitude, (b) Velocity, (c) Phase

### 3.2 先天性圆窗封闭

先天性圆窗闭合比较罕见,医学界推测可能是一种遗传性疾病<sup>[3]</sup>。这些患者表现为复杂的听力

障碍,具有30~40 dB的听力阈值以及50 dB左右的气骨导差,鼓室导抗测试曲线呈A型同时伴随声波反射的缺失<sup>[2]</sup>。

## 3 中耳结构动力响应对圆窗病变的反馈

### 3.1 硬化症导致的圆窗封闭

对于硬化症导致的镫骨及圆窗壁龛封闭,镫骨替换术前病人表现出正常传导性听力损失,术后听力表现却比单纯硬化症引起的镫骨封闭的病人差很多<sup>[13]</sup>。Shea等<sup>[14]</sup>研究发现,在超过3万例进行镫骨替换手术的病人中,硬化症晚期导致的圆窗封闭的病人约占1%,其中仅有1/3伴随圆窗封闭并发症的病人在术后听力得到提升。

鉴于临床上硬化的相关文献,选取卵圆窗和圆窗膜硬化后的弹性模量为正常生理状态的100倍进行分析<sup>[15]</sup>。基于本数值模型,模拟计算在90 dB声压下全耳频率响应,利用软件后处理功能得出镫骨足板振幅、速度以及相位角差值频率响应曲线,并与正常人耳进行比较(见图5)。在所有频段下,硬化症造成的卵圆窗圆窗封闭都会导致镫骨底板振幅和速度下降,但共振频率没有改变。总体来说,在各个频段镫骨振幅下降均明显,在0.6 kHz可达到30.2 dB。镫骨底板速度方面在0.6 kHz以上频段下降明显,尤其在共振频率0.9 kHz下降最大。而数值模拟出的卵圆窗及圆窗相位角变化幅度较实验数据收缩明显,两者在10 kHz时下降达到最大仅90°。

障碍,具有30~40 dB的听力阈值以及50 dB左右的气骨导差,鼓室导抗测试曲线呈A型同时伴随声波反射的缺失<sup>[2]</sup>。

通过采取限制圆窗任意方向位移的方法模拟先天性圆窗封闭的病理状态, 得出的镮骨足板振幅、速度以及相位角差值频率响应曲线(见图6)。圆窗的先天性封闭在低频段对镮骨振幅影响甚微, 而在中高频则下降明显, 共振频率 0.8 kHz 时下降

最大, 可达到 12.04 dB。振动速度影响方面, 镮骨对于单纯的圆窗封闭没有明显下降。在相位角方面, 先天性圆窗封闭对圆窗本身影响突出, 使其相位角几乎无变化, 而此时镮骨底板相位角较正常有最大 40° 的收缩。

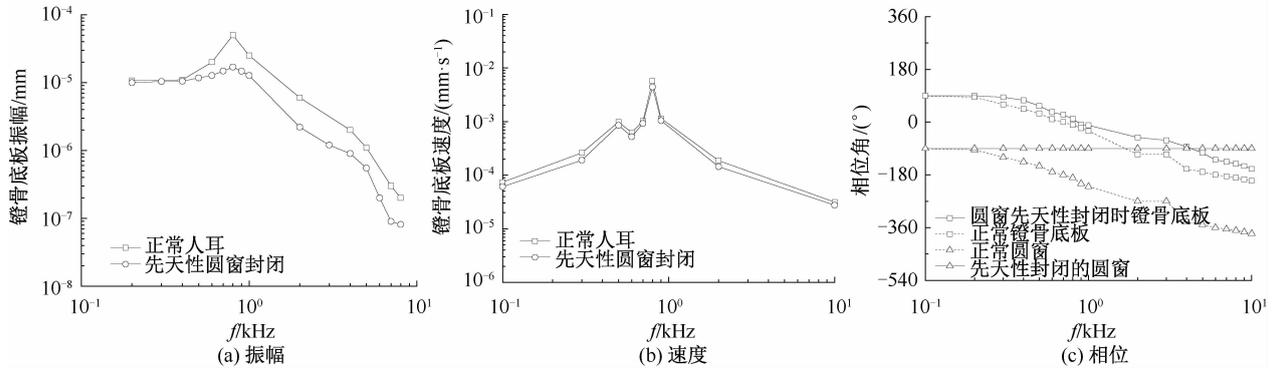


图6 先天性圆窗封闭时镮骨底板响应曲线(90 dB SPL)

Fig. 6 Curves of the stapes footplate with congenital round window closure (a) Amplitude, (b) Velocity, (c) Phase

## 4 讨论

为使临床上通过检测中耳进而能为诊断并修复圆窗封闭提供理论依据, 采用有限元模拟不同圆窗封闭病情下镮骨的动力响应。根据现有的国内外临床研究, 圆窗封闭分为先天性和硬化症导致的两种情况<sup>[3-4]</sup>。硬化症导致的表现形式为圆窗和卵圆窗的纤维化, 密度和弹性模量增加。先天性圆窗封闭现被医学界猜测为一种遗传疾病, 形式为圆窗不完全发育所致的振动能力丧失。外科手术中已经证明动物耳圆窗的封闭会导致听力阈值的变化<sup>[16]</sup>。

由图5(a)和图6(a)比较可以看出, 硬化症情况下镮骨振幅下降在 20 ~ 30 dB 而先天性圆窗封闭情况下镮骨振幅下降则在 12 dB 以内。形成这种差异的主要原因是卵圆窗和圆窗的封闭都在一定程度上导致耳蜗输入阻抗的提升, 在此情况下声波通过镮骨振动进入前庭阶会面临较正常更大的阻力, 从而只有一部分声能可以抵达蜗管, 故圆窗卵圆窗同时硬化封闭较单纯的圆窗封闭产生更大阻抗, 使镮骨振幅下降更为明显。同时从图5(c)和图6(c)比较中看出, 硬化症情况下镮骨相位角较先天性圆窗封闭时变化更加微小, 较正常状态收缩最高达 180°, 这也从侧面印证了前者镮骨振幅下降高于后

者这一动力响应特性。

由图5(b)和图6(b)比较可看出, 硬化症和先天性封闭导致的圆窗封闭对中耳动力响应影响的一个重要区别体现在镮骨振动速度的改变。圆窗作为内耳淋巴液压力释放的出口同时促进基底膜震动, 封闭时提升耳蜗阻抗但对镮骨振动速度影响不明显, 这和直接与镮骨接触的卵圆窗封闭时有所不同。因此, 镮骨振动速率是否受影响, 即病人听力是否有延迟是判断先天性还是硬化症导致圆窗封闭的一项重要指标。

## 5 结论

本文利用 PATRAN/NASTRAN 软件有限元软件对人耳听力系统建模, 基于振幅、速度和相位角变化, 对比研究镮骨动力行为特征对两种不同类型圆窗封闭的反馈, 得出结论如下:

(1) 病人镮骨振动速度下降, 听力产生延时是硬化症导致的圆窗封闭的一项表征, 也是与先天性圆窗封闭区分的一项重要依据。

(2) 临床上通过对镮骨进行检测, 各频段振幅下降均在 12 dB 以内可判断为先天性圆窗封闭, 当各频段下降不低于 20 dB 时可判断为硬化症导致的圆窗封闭。

本文的数值模拟结果弥补了实验手段不足及

临床操作高风险性导致的圆窗病变情况下听力行为特征研究的缺失,为今后能通过检测中耳进而能了解圆窗病情提供新思路 and 理论依据。

### 参考文献:

- [ 1 ] NAGERIS BI, ATTIAS J, SHEMESH R, *et al.* Effect of cochlear window fixation on air- and bone-conduction thresholds [J]. *Otol Neurotol*, 2012, 33(9): 1679-1684
- [ 2 ] PAPPAS DG, PAPPAS DG, HEDLIN G. Round window atresia in association with congenital stapes fixation [J]. *Laryngoscope*, 1998, 108(8 Pt 1): 1115-1118.
- [ 3 ] LINDER TE, MA F, HUBER A. Round window atresia and its effect on sound transmission [J]. *Otol Neurotol*, 2003, 24(2): 259-263.
- [ 4 ] CAI Q, WHITCOMB C, EGGLESTON J, *et al.* Round window closure affects cochlear responses to suprathreshold stimuli [J]. *Laryngoscope*, 2013, 123(12): E116-E121.
- [ 5 ] GAN RZ, REEVES BP, WANG X. Modeling of sound transmission from ear canal to cochlea [J]. *Ann Biomed Eng*, 2007, 35(12): 2180-2195.
- [ 6 ] YAO WJ, CHEN YQ, MA JW, *et al.* Numerical simulation on the dynamic behavior of the basilar membrane in the spiral cochlea [J] *Biomed Res*, 2016, 27 (3): 977-984.
- [ 7 ] CHEN YQ, YAO WJ. Mechanical model of round window membrane under reverse excitation [J] *Appl Math Mech*, 2016, 37(10): 1-8.
- [ 8 ] 姚文娟, 李兵, 胡宝琳, 等. 置换部分听骨镫复物后对人耳听力恢复的影响 [J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 58-64. YAO WJ, LI B, HU BL, *et al.* Effect of partial ossicular prosthesis replacement on hearing restoration of human [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(1): 58-64.
- [ 9 ] 林飘, 姚文娟, 黄新生, 等. 细菌生物膜对置换钛质听骨镫复物听力恢复的影响 [J]. *医用生物力学*, 2015, 30(3): 238-242. LIN P, YAO WJ, HUANG XS, *et al.* Effects of bacterial biofilm on hearing restoration with titanium partial ossicular prosthesis replacement [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(3): 238-242.
- [ 10 ] 姚文娟, 李晓青, 李武, 等. 中耳病变及人工镫骨形体研究 [J]. *医用生物力学*, 2009, 24(2): 118-122. YAO WJ, LI X, LI W, *et al.* Research on pathological changes of middle-ear and artificial stapes [J]. *J Med Biomed*, 2009, 24(2): 118-122.
- [ 11 ] STENFELT S, PURIA S, HATO N, *et al.* Basilar membrane and osseous spiral lamina motion in human cadavers with air and bone conduction stimuli [J]. *Hear Res*, 2003, 181(1): 131-143.
- [ 12 ] KIM N, HOMMA K, PURIA S. Inertial bone conduction: Symmetric and anti-symmetric components [J]. *J Assoc Res Otolaryngol*, 2011, 12(3): 261-279.
- [ 13 ] HANSEN MC. Otosclerosis and sensorineural hearing loss. A clinical study [J]. *Arch otolaryngol*, 1983, 109(9): 598-600.
- [ 14 ] SHEA JJ, FARRIOR JB. Stapedectomy and round window closure [J]. *Laryngoscope*, 1987, 97(1): 10-12.
- [ 15 ] ANTOLI-CANDELA F, MCGILL T, PERON D. Histopathological observations on the cochlear changes in otosclerosis [J]. *Ann Oto Rhinol Laryn*, 1977, 86(6): 813-820.
- [ 16 ] TONNDORF J, TABOR JR. Closure of the cochlear windows: Its effects upon bone conduction in cats [J]. *J Acoust Soc Am*, 1960, 32(11): 1394-1398.