

文章编号:1004-7220(2017)04-0369-06

典型中耳病变对圆窗激振听力补偿性能影响的数值分析

周凯¹, 刘后广¹, 饶柱石², 杨善国¹, 赵禹¹, 徐丹¹

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 徐州 221116; 2. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: **目的** 研究典型中耳病变对圆窗激振听力补偿效果的影响,为圆窗激振式人工中耳的优化设计提供参考。**方法** 利用 CT 扫描和逆向成型技术建立包括中耳和耳蜗的有限元模型,并验证模型的可靠性。再基于该模型,通过改变相应组织的材料属性,分别模拟镫骨环韧带硬化、镫骨不正常发育和锤骨前韧带硬化 3 种典型中耳病变。通过对比相应的基底膜响应,分析这 3 种病变对圆窗激振听力补偿效果的影响。**结果** 镫骨不正常发育主要在高频处降低圆窗激振的效果,镫骨环韧带硬化和锤骨前韧带硬化主要恶化圆窗激振低频段的响应。3 种病变中,镫骨环韧带硬化对圆窗激振听力补偿效果影响较大,等效声压的减小量可高达 17 dB。**结论** 中耳病变恶化圆窗激振的听力补偿效果,且恶化量较大,故在设计圆窗激振式人工中耳时需要针对性地提高其作动器的输出量。

关键词: 中耳病变; 圆窗激振; 优化补偿; 基底膜位移; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.04.012

Numerical analysis on sound compensation performance of round window stimulation in typical middle ear diseases

ZHOU Kai¹, LIU Hou-guang¹, RAO Zhu-shi², YANG Shan-guo¹, ZHAO Yu¹, XU Dan¹

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Objective To study the effect of typical middle ear diseases on sound compensation of round window (RW) stimulation, so as to provide references for the optimal design of middle ear implants by RW stimulation. **Methods** The finite element model of the middle ear and cochlea was built by CT scanning and reverse engineering technique, and its reliability was also verified. On the basis of the model and by changing material properties of corresponding tissues, three typical middle ear diseases were simulated: hardening of stapedial annular ligament, abnormal stapedial bone growth and hardening of anterior malleolar ligament. Then the response from displacement of basilar membrane (BM) was compared to analyze the impact of this 3 types of middle ear diseases on sound compensation of RW stimulation. **Results** The stapes with abnormal bone growth severely deteriorated the equivalent sound pressure (ESP) of RW stimulation at higher frequencies, while the hardening of stapedial annular ligament and the hardening of anterior malleolar ligament prominently decreased ESP of RW stimulation at lower frequencies. Among the 3 types of middle ear diseases, hardening of stapedial annular ligament affected the sound compensation of RW stimulation more significantly with the amount of the ESP reduction up to 17 dB.

收稿日期:2016-08-31; 修回日期:2016-10-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51305442),江苏省自然科学基金项目(BK20130194),高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130095120010)。

通信作者:刘后广,副教授,博士研究生导师,E-mail:liuhg@cumt.edu.cn。

Conclusions Middle ear diseases can deteriorate the sound compensation of RW stimulation seriously with large deterioration, Therefore, the output of the actuator should be targeted to improve when designing the middle ear implants by RW stimulation.

Key words: Middle ear diseases; Round window stimulation; Optimization and compensation; Basilar membrane displacement; Finite element analysis

耳聋是社会最常见的疾病之一。统计资料显示,全球有近6.42亿人不同程度的听力障碍^[1],中国就有2000多万^[2]。其中,感音神经性耳聋占60%,至今尚缺乏有效治疗,通常借助助听器改善。但传统助听器具有高频增益小、佩戴舒适性差、喧叫等不足。针对这一问题,中耳植入式助听装置成为国内外研究的热点^[3-6]。该装置将接收到的声音信号转换为电信号,并且放大后由作动器直接作用于听骨链或圆窗膜,分别称为正向激振和逆向(圆窗)激振。当患者的听骨链损伤时,正向激振效果将会降低甚至无效,故圆窗激振受到了越来越多的关注^[7-9]。

临床报告显示,圆窗激振补偿性能对于不同患者表现出很大的差异性^[10]。为了确定这种不确定性,国内外学者开展了很多研究工作。Arnold等^[11]研究了中耳植入式助听装置在圆窗处的不同放置方式对其激振效果的影响。Zhang等^[12]通过对作动器模型的尺寸和重量赋值不同,研究了中耳植入式助听装置本身参数对圆窗激振的影响。Tian等^[13]通过改变中耳植入式助听装置与耳蜗的耦合机制,分析了其对圆窗激振的影响。Maier等^[14]指出,在圆窗上施加的初静力是引起该差异性的原因之一。上述研究为圆窗激振式人工中耳的性能改进提供了思路,但均是针对作动器本身有关设计参数进行分析,而针对中耳病变影响的研究鲜有报道。如前所述,圆窗激振补偿听力主要用于听骨链病变患者,中耳病变的方式多种多样,其中典型的包括镫骨环韧带硬化^[15-16]、镫骨不正常发育^[17-18]和锤骨前韧带硬化^[16,19]等。这些组织上的变化如何影响圆窗激振的听力补偿性能,直接关系到人工中耳作动器的设计。

圆窗激振的振动传入路径正好与正常感声的相反,由于这种听力补偿方式较新颖,目前关于这种听力补偿方案的性能评价尚无标准。Nakajima等^[20]提出了基于耳蜗内压差来评估圆窗激振听力补偿性

能。而王学林等^[21]认为,由于基底膜的运动是导致人感音的直接原因,采用基底膜响应来评估人耳感声及圆窗激振的听力补偿效果将更为准确。

针对上述问题,本文采用基于CT扫描以及逆向成型技术建立人耳三维有限元模型,模拟3种典型中耳病变,并通过对比分析圆窗激振下基底膜特征频率处的位移,研究典型中耳病变对圆窗激振的影响。研究结果可用于改进植入式人工中耳装置,并确保它的听力补偿更加有效。

1 材料与方法

1.1 有限元模型

如图1所示,所建人耳有限元模型主要基于前期文献报道的模型^[22]。考虑到耳道阻抗相对较小^[23],且为了减小计算量,将原模型中对本文分析影响不大的耳道部分删除。此外,由于主要关注耳蜗内部动态响应,为了使得耳蜗基底膜响应更逼近实验值,对模型中部分组织的材料属性进行微调,即设定锤骨上韧带和锤骨侧韧带的弹性模量分别为49.67 kPa^[24],镫骨肌、砧镫关节和鼓膜环韧带的弹性模量分别为26、0.44、0.15 MPa^[25-26],基底膜的阻尼系数为 $\alpha = 0 \text{ s}^{-1}$, $\beta = 7.5 \mu\text{s}$ ^[27]。

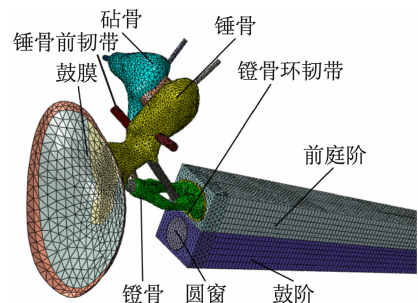


图1 人耳有限元模型

Fig. 1 Finite element model of human ear

1.2 圆窗激振的模拟及性能评价

由于本文研究的重点是典型中耳病变对圆窗激

振听力补偿性能的影响,而非圆窗激振所用作动器设计,故建模时没有考虑作动器具体结构。考虑到现有临床所用圆窗激振式人工中耳多为电磁式人工中耳,而电磁式人工中耳可近似为力激振^[28],故通过在圆窗膜上施加法向激振力来近似模拟电磁式作动器激振圆窗。此外,所施加力的幅值参考文献[12-13]中的数据,设为 50 μN,以激振起近似 100 dB 鼓膜声压激振下的基底膜位移量。

为了准确评估圆窗激振的听力补偿效果,引入基于基底膜位移的等效声压级 (equivalent sound pressure, ESP) 为评估标准:

$$P_{eq} = 100 + 20\lg\left(\frac{d_{rw}}{d_{ac}}\right) \quad (1)$$

式中: d_{ac} 和 d_{rw} 分别代表在鼓膜施加 100 dB 声压激振及在圆窗施加 50 μN 力激振时所对应的基底膜特征频率处位移。

1.3 典型中耳病变变形的模拟

中耳病变的方式很多,选用镫骨环韧带 (stapedial annular ligament, SAL) 硬化、镫骨不正常发育和锤骨前韧带 (anterior malleal ligament, AML) 硬化 3 种典型病变方式进行研究。在模拟镫骨环韧带硬化时,将弹性模量增加 10 倍^[29];在模拟锤骨前韧带硬化时,将弹性模量增加 1 000 倍^[16];在模拟镫骨不正常发育时,将质量增加 5 倍^[30]。

2 结果

2.1 模型的验证

为保证修改后人耳模型的可靠性,通过 3 组数据的对比对模型进行验证。这 3 组分析均通过 90 dB 声压级 (sound pressure level, SPL) 的声压激振鼓膜所得。

基底膜的选频特性表现为基底膜靠近蜗顶的部分对低频敏感,靠近蜗底的部分对高频敏感,不同频率所对应基底膜的敏感位置是不同的。它是验证耳蜗部分可靠性的重要依据。结果表明,模型得到的基底膜特征频率与基底膜纵向位置对应关系的数据与文献[31-32]中的实验数据一致(见图 2)。此外,对基底膜上沿纵向离镫骨 12 mm 处的频响特性进行计算,将模型所得结果与文献[33-34]中实验测量值进行比较。对比基底膜的相对运动幅值曲线可知,本文所得数据与 Gundersen 等^[33]实验测量值在

高频段相吻合,且在总体趋势上保持一致,该基底膜所测部位的敏感频率为 4 kHz[见图 3(a)],与图 2 结果相吻合。对比基底膜相对运动相位可知,本文所得数据与 Stenfelt 等^[34]实验测量值保持良好的一致性[见图 3(b)]。

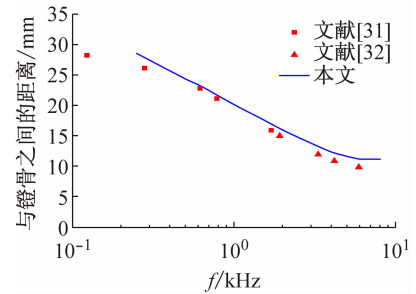
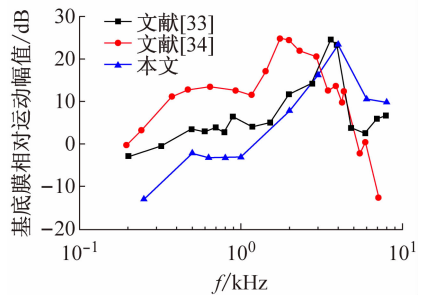
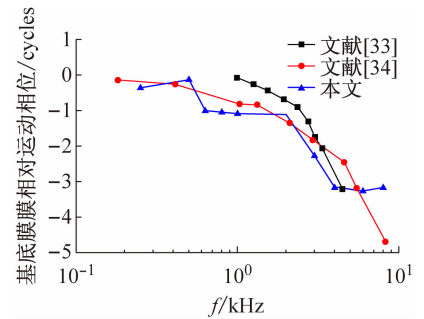


图 2 基底膜的特征频率与纵向位置对应关系

Fig. 2 Characteristic frequency to place mapping for basilar membrane



(a) 基底膜相对运动幅值



(b) 基底膜相对相位

图 3 基底膜频响特性验证

Fig. 3 Verification for frequency response characteristic of basilar membrane (a) Relative motion amplitude, (b) Relative motion phase

耳蜗输入阻抗反映了内耳对中耳的声阻。如图 4 所示,模型所得的耳蜗阻抗与文献[35-36]中的实验数据较吻合,更是与文献[35]中的实验数据趋势相同。

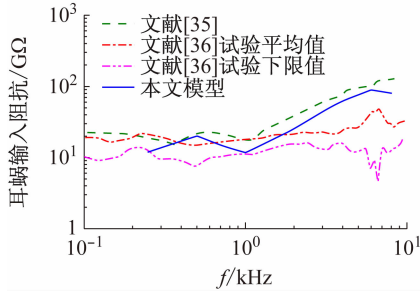


图4 耳蜗输入阻抗对比

Fig. 4 Comparison of model-derived cochlear input impedance with experimental data

通过上述3组数据对比可知,本文所用的人耳有限元模型能够较准确地模拟人耳传声特性,可以用于圆窗激振分析。

2.2 镫骨不正常发育对圆窗激振的影响

通过增加镫骨质量模拟镫骨不正常发育这一病变形式,把模型中镫骨密度由 $2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 增加为 $1.1 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$,即质量提高了5倍^[30]。在相同圆窗激振下,镫骨不正常发育对圆窗激振的低频段($<600 \text{ Hz}$)影响甚微;但当频率超过600 Hz时,镫骨不正常发育将明显恶化圆窗激振的等效声压,且恶化程度随频率增大而增大[见图5(a)]。恶化最大值位于8 kHz处(6 dB)[见图5(b)]。

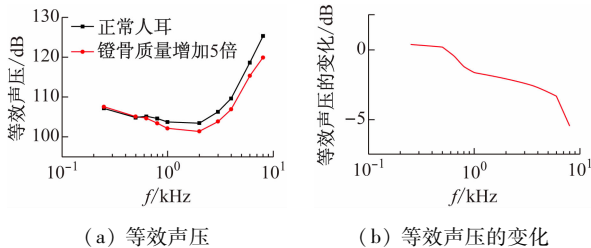


图5 镫骨不正常发育对圆窗激振的影响

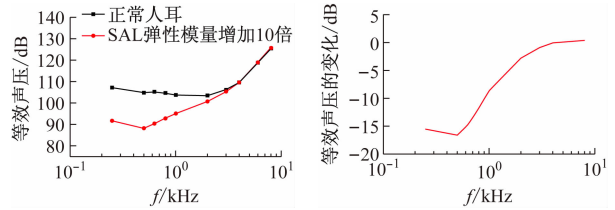
Fig. 5 Effect of abnormal stapedial bone growth on round window stimulation

(a) Equivalent sound pressure (ESP), (b) Change of ESP

2.3 镫骨环韧带硬化对圆窗激振的影响

通过将镫骨环韧带弹性模量增大10倍模拟镫骨环韧带硬化这一病变形式^[29],即把镫骨环韧带的弹性模量由0.2 MPa增加为2 MPa。图6(a)对比了镫骨环韧带硬化与正常时在相同圆窗驱动下所对应的等效声压曲线变化。当频率在3 kHz以上时,镫骨环韧带硬化对圆窗激振的影响甚微;但当频率低于3 kHz时其影响效果明显。由此可见,镫骨环韧

带硬化主要恶化圆窗激振的低频响应。恶化量最大值位于500 Hz处,高达17 dB[见图6(b)]。



(a) 等效声压

(b) 等效声压的变化

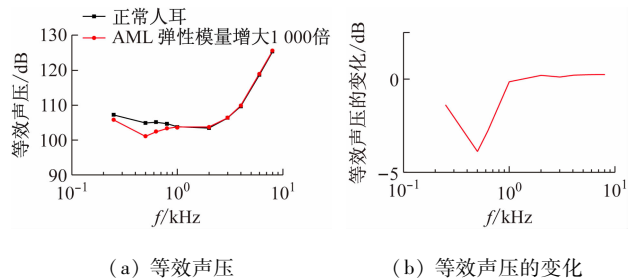
图6 镫骨环韧带硬化对圆窗激振的影响

Fig. 6 Effect of the hardening of SAL on round window stimulation

(a) Equivalent sound pressure (ESP), (b) Change of ESP

2.4 锤骨前韧带硬化对圆窗激振的影响

通过将锤骨前韧带弹性模量增大1000倍模拟锤骨前韧带硬化这一病变形式^[16],即把锤骨前韧带的弹性模量由21 MPa增加为21 GPa。图7(a)显示了锤骨前韧带硬化时与锤骨前韧带正常时在相同圆窗驱动下所对应的等效声压曲线图。当频率在1 kHz以上时,锤骨前韧带硬化对圆窗激振的影响甚微;但当频率低于1 kHz时,锤骨前韧带硬化明显恶化了圆窗激振的等效声压。最大恶化量位于500 Hz(4 dB)[见图7(b)]。



(a) 等效声压

(b) 等效声压的变化

图7 锤骨前韧带硬化对圆窗激振的影响

Fig. 7 Effect of hardening of AML on round window stimulation

(a) Equivalent sound pressure (ESP), (b) Change of ESP

3 讨论

人耳具有复杂几何形态、超微结构特征,系统的动态特性实验研究较为困难。为了研究人耳传声特性及辅助设计助听装置,有限元法被国内外该领域学者所采用^[5,21,24,37]。本文亦采用有限元法研究中耳病变在何种程度上影响圆窗激振的听力补偿效果。值得说明的是,为了减小建模工作量,将模型中的耳蜗建成直管,而非实际的螺旋结构。之所以做

这种简化处理,是因为螺旋结构主要提高低频感声效果^[38-39],而人工中耳所关心的感音神经性听力损伤主要发生在高频,故这种近似处理对本文工作影响不大。在评估听力补偿性能时,以往通过激振听小骨补偿听力的传统人工中耳,主要是通过分析镫骨足底板运动来实现^[28,40]。但圆窗激振不同于传统人工中耳,它避开听骨链,直接激励耳蜗圆窗,属于逆向激振,即激励圆窗带动耳蜗淋巴液,再通过淋巴液在耳蜗内的流动带动镫骨足板运动。可见,此时镫骨足板的运动与正常感声对应的镫骨足板运动必存在不同。本文均基于基底膜运动评估圆窗激振的听力补偿性能,可以提高评估的准确性。

针对中耳病变人耳的传声特性,已有很多力学研究报道^[41-43],这些工作对病变的治疗具有重要意义,但主要是针对其对正常人耳感声影响的研究。而圆窗激振作为一种逆向耳蜗激励,与正常感声的声音传递路径相反,故中耳病变对圆窗激振和正常人耳感声所产生的影响并不一定相同。此外,现有针对中耳病变的研究多种多样,如鼓膜穿孔^[42]、耳硬化^[43]、锤骨柄病变^[41]等。而本文只研究了与耳硬化相关的中耳病变,这是因为鼓膜穿孔、锤骨柄病变等中耳疾病不需要圆窗激振式人工中耳来补偿听力,可直接借助于传统人工中耳。

考虑到现有临床上所用圆窗激振式人工中耳的工作频段最高为 8 kHz^[44],故本文的研究主要在 0.25 ~ 8.00 kHz 频段。结果表明,所研究的 3 类典型中耳病变均降低圆窗激振的听力补偿效果,其中镫骨环韧带硬化对圆窗激振的恶化量可高达 17 dB,与 Zhang 等^[12]研究的振子横截面积对圆窗激振听力补偿影响(25 dB)及 Tian 等^[13]研究的耦合层材料对圆窗激振影响(10 dB)的量级相当。因此,研究圆窗激振式人工中耳术后效果不稳定时,应同时考虑中耳病变的影响。此外,镫骨不正常发育主要影响圆窗激振高频段,这是因为镫骨质量的增加使该模型的谐振频率下移。与之相反,镫骨环韧带硬化主要恶化圆窗激振的低频段,这与 Huber 等^[16]和 Feng 等^[29]研究的镫骨环韧带硬化对人耳感声影响的结果类似。出现这种结果,主要是因为这种硬化增大了系统的刚度,进而降低了系统的低频响应。同样的,锤骨前韧带硬化对圆窗激振的影响也主要集中在低频段。

4 结论

本文通过建立人耳有限元模型,基于基底膜特征频率处响应,对比研究了 3 种典型中耳病变方式对圆窗激振听力补偿性能的影响。结果表明,镫骨不正常发育主要降低圆窗激振的高频性能,而镫骨环韧带硬化和锤骨前韧带硬化则主要恶化圆窗激振补偿听力的低频效果。且镫骨环韧带硬化对圆窗激振听力补偿效果降低量较大,可高达 17 dB。因此,设计圆窗激振式人工中耳时,必须考虑中耳病变对其补偿效果的恶化,针对性地增大其作动器的输出量,进而确保实际的听力补偿效果。

参考文献:

- [1] 朱晓芳,徐策. 青少年听力损伤的研究进展 [J]. 中国现代医生, 2015, 53(11): 153-156.
- [2] 第二次全国残疾人抽样调查办公室. 第二次全国残疾人抽样调查资料 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [3] HAMANISHI S, KOIKE T, MATSUKI H, et al. A new electromagnetic hearing aid using lightweight coils to vibrate the ossicles [J]. IEEE T Magn, 2004, 40(5): 3387-3393.
- [4] KAHUE CN, CARLSON ML, DAUGHERTY JA, et al. Middle ear implants for rehabilitation of sensorineural hearing loss: A systematic review of FDA approved devices [J]. Otol Neurotol, 2014, 35(7): 1228-1237.
- [5] LIU HG, TA N, MING XF. Design of floating mass type piezoelectric actuator for implantable middle ear hearing devices [J]. Chin J Mech Eng, 2009, 22(2): 221-226.
- [6] LIU HG, RAO ZS, HUANG XS, et al. An incus-body driving type piezoelectric middle ear implant design and evaluation in 3D computational model and temporal bone [J]. Sci World J, 2014, 2014(4): 121624-121624.
- [7] 陈永正. 耳蜗正逆向驱动传声效率的实验研究和数值模拟 [D]. 上海: 复旦大学博士学位论文, 2013.
- [8] 韩帅,刘后广,杨建华,等. 基于有限元模型的圆窗激振与正常感声下耳蜗微观动态特性 [J]. 中国科技论文, 2016, 11(4): 444-448.
- [9] 王学林. 蜗窗激振与外耳道激振产生的耳蜗压力差的比较分析 [J]. 生物医学工程学杂志, 2012, 29(6): 1109-1113.
- [10] SPRINZL GM, WOLF-MAGELE A, SCHNABL J, et al. The active middle ear implant for the rehabilitation of sensorineural, mixed and conductive hearing losses [J]. Laryngo-Rhino-Otol, 2011, 90(9): 560-572.
- [11] ARNOLD A, CCANDREIA S. Factors improving the vibration transfer of the floating mass transducer at the round window [J]. Otol Neurotol, 2010, 31(1): 122-128.
- [12] ZHANG XM, GAN RZ. A comprehensive model of human ear for analysis of implantable hearing devices [J]. Ieee

- Trans biomed Eng, 2011, 58(10): 3024-3027.
- [13] TIAN JB, HUANG XS, RAO ZS, *et al.* Finite element analysis of the effect of actuator coupling conditions on round window stimulation [J]. J Mech Med Biol, 2015, 15(4), DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0219519415500487>.
- [14] MAIER H, SALCHER R, SCHWAB B, *et al.* The effect of static force on round window stimulation with the direct acoustic cochlea stimulator [J]. Hear Res, 2013, 301(7): 115-124.
- [15] ZHANG X, GAN RZ. Finite element modeling of energy absorbance in normal and disordered human ears [J]. Hear Res, 2012, 301(7): 146-155.
- [16] HUBER A, KOIKE T, WADA H, *et al.* Fixation of the anterior malleolar ligament: Diagnosis and consequences for hearing results in stapes surgery [J]. Ann Otol Rhinol Laryngol, 2003, 112(4): 348-355.
- [17] BROOKLER KH. Clinical findings in a patient with aural fullness [J]. Ear Nose Throat J, 2008, 87(2): 74-75.
- [18] MILLER MH, SCHEIN JD. Selected complex auditory disorders [J]. J Rehabil Res Dev, 2005, 42(4 Suppl 2): 1-8.
- [19] FISCH U, ACAR GO, HUBER AM. Malleostapedotomy in revision surgery for otosclerosis [J]. Otol Neurotol, 2001, 22(6): 776-785.
- [20] NAKAJIMA HH, MERCHANT SN, ROSOWSKI JJ. Performance considerations of prosthetic actuators for round-window stimulation [J]. Hear Res, 2009, 263(1-2): 114-119.
- [21] 王学林, 胡于进. 蜗窗激振评价的有限元计算模型研究[J]. 力学学报, 2012, 44(3): 622-630.
- [22] 田佳彬, 饶柱石, 塔娜, 等. 人工中耳悬浮式压电振子的优化设计[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 135-140.
- [23] ZWISLOCKI J. Analysis of the middle-ear function. Part I: Input Impedance [J]. J Acoust Soc Am, 1962, 34: 1514-1523.
- [24] 刘迎曦, 李生, 孙秀珍. 人耳鼓膜病变数值分析[J]. 医用生物力学, 2008, 23(4): 275-278.
- LIU YX, LI S, SUN XZ. Numerical analysis of pathologic tympanic membrane of human ear [J]. J Med Biomech, 2008, 23(4): 275-278.
- [25] VOLANDRI G, PUCCIO FD, FORTE P, *et al.* Biomechanics of the tympanic membrane [J]. J Biomech, 2011, 44(7): 1219-1236.
- [26] 刘后广. 新型人工中耳压电振子听力补偿的理论与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学博士学位论文, 2011.
- [27] HU YJ. Finite element modelling of human auditory periphery including a feed-forward amplification of the cochlea [J]. Comput Methods Biomech Biomed Eng, 2014, 17(10): 1096-1107.
- [28] BORNITZ M, HARDTKE HJ, ZAHNERT T. Evaluation of implantable actuators by means of a middle ear simulation model [J]. Hear Res, 2010, 263(1-2): 145-151.
- [29] FENG B, GAN RZ. Lumped parametric model of the human ear for sound transmission [J]. Biomech Model Mechanobiol, 2004, 3(1): 33-47.
- [30] FROST H. Observations on the fundamental nature of otosclerosis. In: SCHUKNECHT H, Ed. Otosclerosis [M]. Boston: Little, Brown and Company, 1962.
- [31] BEKESY GV. Experiments in hearing [M]. New York: McGraw-Hill, 1960.
- [32] KRINGLEBOTN M, GUNDERSEN T, KROKSTAD A, *et al.* Noise-induced hearing losses. Can they be explained by basilar membrane movement? [J]. Acta Otolaryngol Suppl, 1979, 360(Suppl 360): 98-101.
- [33] GUNDERSEN T, SKARSTEIN O, SIKKELAND T. A study of the vibration of the basilar membrane in human temporal bone preparations by the use of the Mossbauer effect [J]. Acta Otolaryngol, 2009, 86(3-4): 225-232.
- [34] 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(1-2): 131-143.
- [35] PURIA S, PEAKE WT, ROSOWSKI JJ. Sound-pressure measurements in the cochlear vestibule of human-cadaver ears [J]. J Acoust Soc Am, 1997, 101(1): 2754-2770.
- [36] AIBARA R, WELSH JT, PURIA S, *et al.* Human middle-ear sound transfer function and cochlear input impedance [J]. Hear Res, 2001, 152(1-2): 100-109.
- [37] 姚文娟, 李兵, 胡宝琳, 等. 置换部分听骨膜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.
- [38] MA JW, YAO WJ. Research on the distribution of pressure field on the basilar membrane in the passive spiral cochlea [J]. J Mech Med Biol, 2014, 14(4), DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0219519414500614>.
- [39] MANOUSSAKI D, DIMITRIADIS EK, CHADWICK RS. Cochleas graded curvature effect on low frequency waves [J]. Phys Rev Lett, 2006, 96(8): 088701.
- [40] LIU H, GE S, CHENG G, *et al.* Transducer type and design influence on the hearing loss compensation behaviour of the electromagnetic middle ear implant in a finite element analysis [J]. Adv Mech Eng, 2015, 6(4): 867108-867108.
- [41] LIU Y, LI S, SUN X. Numerical analysis of ossicular chain lesion of human ear [J]. Acta Mech Sinica, 2009, 25(2): 241-247.
- [42] 孙秀珍, 李生, 刘迎曦. 人耳鼓膜穿孔对中耳传声影响的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2010, 27(6): 1102-1106.
- [43] 姚文娟, 李晓青, 李武, 等. 中耳病变及人工镗骨形体研究 [J]. 医用生物力学, 2009, 24(2): 118-122.
- YAO WJ, LI XQ, LI W, *et al.* Research on pathological changes of middle ear and artificial stapes [J]. J Med Biomech, 2009, 24(2): 118-122.
- [44] SZIKLAI I, SZILVASSY J. Functional gain and speech understanding obtained by vibrant soundbridge or by open-fit hearing aid [J]. Acta Otolaryngol, 2011, 131(131): 428-433.

文章编号:1004-7220(2017)04-0375-05

多聚甲醛固定对大鼠椎骨黏弹性影响的实验研究

颀天阳¹, 程朋真²

(1. 西安市铁一中学, 西安 710054; 2. 第四军医大学西京医院 骨科, 西安 710032)

摘要: **目的** 观察多聚甲醛固定对大鼠椎骨黏弹性力学性能的影响,从生物力学角度寻找松质骨样品的最佳保存方式。**方法** 选择8周龄健康雌性SD大鼠20只,手术分离获得完整的腰椎L4和L5共40只,随机平均分为固定组和对照组,固定组置于4%多聚甲醛中固定72 h,对照组置于5 mL EP管内-20 °C冷冻保存。两组随机各取10只分别行应力松弛和蠕变实验,7 200 s后收集样品并通过显微CT分析其微观结构变化。**结果** 固定组松弛蠕变曲线相比对照组更加平滑,达到稳态的时间较短,且500 s和7 200 s的松弛蠕变总量明显降低($P < 0.01$)。显微CT结果显示松弛蠕变实验会引起骨小梁断裂,且固定组比对照组骨小梁破坏更加严重。**结论** 多聚甲醛固定法显著降低大鼠椎骨的黏弹性,在力学负荷下更易造成其微观结构破坏,不利于松质骨保存。

关键词: 黏弹性; 应力松弛; 蠕变; 弹性模量

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.05.013

An experimental study on effects of paraformaldehyde fixation on viscoelasticity of rat vertebrae

JIE Tian-yang¹, CHENG Peng-zhen² (1. Xi'an Tie Yi High School, Xi'an 710054, China; 2. Department of Orthopedics, Xijing Hospital, the Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Objective To observe the effect of paraformaldehyde fixation on viscoelastic properties of the vertebrae in rats, so as to find the best methods of preserving cancellous bone samples from the perspective of biomechanics. **Methods** Twenty 8-week-old healthy female Sprague-Dawley rats were selected, and their whole L4 and L5 vertebra were separated by surgery. The total 40 vertebrae were randomly and evenly divided into experimental group and control group. The experimental group was fixed with 4% paraformaldehyde for 72 h, and the control group was transferred to 5 mL EP tube and cryopreserved at -20 °C. Ten vertebrae were randomly selected from each group for stress relaxation and creep experiments. After 7 200 s, the samples were collected and their micro-structure changes were analyzed by micro-CT. **Results** The relaxation creep curve of experimental group was smoother than that of control group, the time to reach steady state was shorter, and the total amount of relaxation creep at 500 s and 7 200 s was significantly decreased ($P < 0.01$). Micro-CT results showed that relaxation and creep experiment could cause trabecular rupture, and trabecular damage was more severe in experimental group than that in control group. **Conclusions** Paraformaldehyde significantly reduce the viscoelasticity of rat vertebrae, and it is more easily to cause microstructure damage under mechanical stimulation, which is detrimental to cancellous bone preservation.

Key words: Viscoelasticity; Stress relaxation; Creep; Elastic modulus

收稿日期:2017-03-21; 修回日期:2017-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(81572192)。

通信作者:程朋真,助理研究员, E-mail: rest5540@163.com。