*

# 评价骨折愈合程度的方法的研究

彭健新 (华南理工大学物理系 广州 · 510641)

马玉英 张若昕 陈启敏 (陕西师范大学应用声学所 西安 · 710062)

本文通过用相关函数、传递函数、谱密度函数分析等方法对叩击声在骨中的振动特性进行分析研究,并将各种方法所得结果进行比较,经过实验验证得出互谱分析是评价骨折愈合程度较好的方法。它为临床诊断骨折愈合程度提供了重要方法。

关键词: 骨、互谱、骨折愈合程度

# Study on methods for assessment of bone Fracture healing

PENG Jianxin

(Depertment of applied physics, South china university of technology)

MA Yuying ZHANG Ruoxi CHEN Qimin

(Applied Acoustics Institute, Shanxi Teachers University, Xian · 710072)

Characteristics of the acoustic vibrational frequency spectrum is analyzed by the use of correlation function, transfer function and cross-power spectrum function. Comparing the results, we concluded experiment with these methods that the cross-power spectrum analysis is a better method of assessment of bone fracture-healing. It suggests an important method for diagnosis of fracture healing for clinical applications.

**Key words** bone, cross-power spectrum, fracture healing

## 1 引 言

骨折是临床骨科中的一种常见病,对骨折愈合程度的估计,传统上主要采用 X 线检查和叩诊[1],X 线不仅对人体有损伤,在骨折愈合初期,X 线无法准确估计治疗情况。而叩诊与医生的经验密切相关。近年来,CT、MRI 技术为骨折愈合程度估计提供了一些新的手段,但费用太高,且分辨率有限[2]。若对骨折愈合程度不能及时准确地诊断,甚至误诊,这样都将会增加治疗难度,延长愈合时间,影响病人康复。一种无损、经济、实用的客观评价骨折愈合过程的方法,将会在骨科临床上具有广阔的应用前景。国外学者在这方面进行了许多研究,取得一些有意义的结果[3,4];国内钱盛友采用不同的分析方法对此进行了研究,得出采用传递函数分析的结果重复性较好[5]。由于各研究者的测试方法、条件及处理方法不一,使得测试结果无法比较,有时甚至彼此矛盾,同时其重复性和可靠性欠佳。本文采用带力传感器的叩击锤激振,双加速度计拾振,对叩击声振动在骨中的低频频谱特性进行分析研究。用相关函数、传递函数、谱密度函数分析等方法分析测试信号,并将各种方法所得结果进行比较,得出互谱分析是准确评价骨折愈合程度的较好方法。

## 2 测试系统

根据测试信号的特点,作者建立了一套集信号采集、处理于一体的高精度测试系统,其框图如图 1,它由带力传感器的叩击锤(F)、加速度计($A_1$)、($A_2$)、滤波放大电路(电荷放大器)、示波器、采样系统、计算机、显示器、打印机等组成。

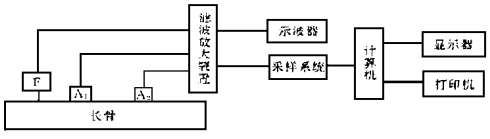



图 1 测试系统框图

由于电荷放大器的输出电压基本不随输入连接电缆的分布电容而变化,因而采用电荷放大器(DHF-4 型,北京测振仪器厂)作放大装置,测试数据用 C 语言编制的信号分析处理软件进行处理。为了减小加速度计及软组织等因素的影响,测试时采用

* 收稿日期: 96-5-14; 修回日期: 97-1-18

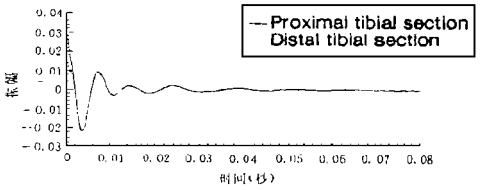
质量为 2.2g 的 YD-8-B 型加速度计拾振,并用弹性带将加速度计系于待测对象上。由于被分析的测试信号频率低于 1kHz,因而采样频率取 2.5kHz,数据处理时 FFT 变换读取的数据点数为 256 点,每次处理为 10 次 FFT 运算平均。

## 3 数据采集

本文对离体新鲜牛胫骨、在体健康人正常胫骨进行了测试。在体测试时,待测肢水平放置,关节处于松驰状态,两加速度计间距离为 10cm,击振点距近端加速度计 5cm,每次测试时叩击 12～15 次,两次叩击之间时间间隔大于 0.5s,以免余振引起波形畸变,每次测试时同时记录力传感器、两加速度计拾到的波形。因条件限制,共测试了 5 根牛胫骨、20 位健康男性。

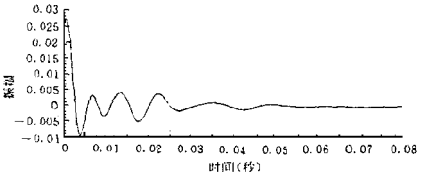
## 4 测试结果与分析

图 2(a) 为离体牛胫骨测试得到的两信号的自相关函数。由图可见,远端加速度计拾到的信号在 $\tau=0$ 时的自相关函数小于近端的加速度计拾到的自相关函数值。由于冲击信号为能量信号,其自相关函数在 $\tau=0$ 时的值等于信号的总能量,测试时,信号在骨中传播时会逐渐衰减,骨缺陷大小不同,信号衰减的程度不同,$R_{A1}(0)$ 与 $R_{A2}(0)$ 的差值也不同。由于测试时采用冲击锤激振,每次激起的加速度的强度不一,分析后得到的 $R_{A1}(0)$ 与 $R_{A2}(0)$ 的差值各异,故而利用两自相关函数在 $\tau=0$ 时的差值无法对骨折愈合过程作出客观量化评价。图 2(b) 为一正常牛胫骨两测点间的互相关函数,由图可知,利用互相关函数可计算出两测点间的延时,从而计算出骨中声振动传播速度。但进一步研究发现,当骨中缺陷较大时,其信号衰减较大,两信号的相似程度极小,无法计算出两测点间的延时,况且在体测试时,还要受软组织等因素影响,因而采用相关函数分析法无法对骨折愈合作出准确的评价。




(a) 自相关函数——:近端,……远端)

为了探求一种评价骨折愈合程度的较好的方法,对同一健康人正常胫骨进行测试,每次同时分析了两通道信号的谱密度函数和传递函数。表 1、图 3 为在胫骨上端(接近膝关节)叩击时测试结果和频谱曲线。表 2、图 4 为在胫骨下端(接近踝关节)叩击时测试结果和频谱曲线。从表图中可以看出,远端自谱主频低于近端自谱主频,互谱主频较自谱主频、传递函数主频稳定,重复性好,平均误差小。多次测试表明:无论是上端叩击还是下端叩击,互谱主频偏差较小,自谱主频偏差次之,传递函数主频偏差较大。

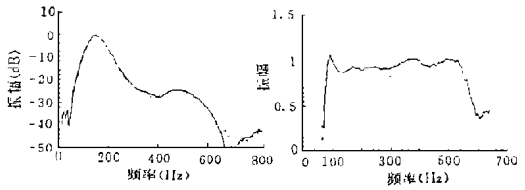



(b) 互相关函数

图 2 牛胫骨的相关函数

表 1 人胫骨上端叩击功率谱和传递函数

| 测试序号 | 自谱 | | 互谱(Hz) | 传递函数 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 近端(Hz) | 远端(Hz) | | 第一主频(Hz) | 第二主频(Hz) |
| 1 | 153.0 | 137.7 | 147.9 | 102.0 | 193.8 |
| 2 | 147.9 | 127.5 | 142.8 | 117.3 | 178.5 |
| 3 | 147.9 | 137.7 | 142.8 | 102.0 | 183.5 |
| 4 | 153.0 | 137.7 | 147.9 | 102.0 | 193.8 |
| 5 | 147.9 | 137.7 | 142.8 | 96.9 | 173.4 |
| 6 | 142.8 | 137.7 | 142.8 | 107.1 | 183.6 |
| 平均 | 148.8 ±2.8 | 136.0 ±2.8 | 144.5 ±2.3 | 104.6 ±5.1 | 184.5 ±6.2 |

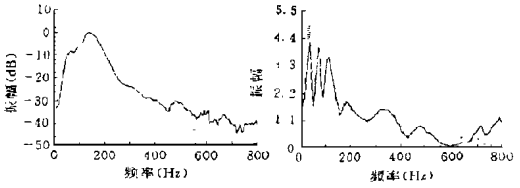



(a) 互功率谱　　(b) 传递函数

图 3 人胫骨上端叩击互谱传递函数

表 2 人胫骨下端叩击功率谱和传递函数

| 测试序号 | 自谱 | | 互谱(Hz) | 传递函数 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 近端(Hz) | 远端(Hz) | | 第一主频(Hz) | 第二主频(Hz) |
| 1 | 147.9 | 137.7 | 142.8 | 112.2 | 183.6 |
| 2 | 142.8 | 127.5 | 137.7 | 102.2 | 178.5 |
| 3 | 142.8 | 127.5 | 137.7 | 107.1 | 178.5 |
| 4 | 142.8 | 137.7 | 137.7 | 102.0 | 183.6 |
| 5 | 142.8 | 132.6 | 137.7 | 112.2 | 173.4 |
| 6 | 137.7 | 137.7 | 137.7 | 102.2 | 183.6 |
| 平均 | 142.8 ±1.7 | 133.5 ±4.3 | 138.6 ±1.4 | 106.3 ±4.3 | 180.2 ±2.6 |




(a) 互功率谱　　(b) 传递函数

图 4　人胫骨下端叩击互谱传递函数

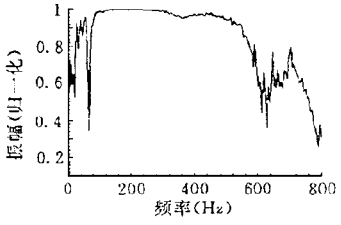



图 5　测试人胫骨时的相干函数

由于传递函数反映系统输入和输出之间的关系,计算时要求系统是常系数线性的,具有单输入单输出特性,无测量噪声,记录信号为无限长。实际上骨是一个非均匀几何体,测试时受软组织、测试仪器、测点位置等因素的影响,所得的传递函数只是骨振动传播特性的一个近似反映。谱密度函数分析是在频率域内研究信号某些特征随频率的分布,主要反映系统的频率构成及其与能量的关系,互功率谱进一步给出两测点间的能量变换,它反映系统的动力特性,受软组织、测试仪器及测点位置的影响较小,因而其主频重复性比自谱、传递函数好,可靠性高,更能准确地评价骨折愈合程度。

图 5 给出两测试信号的相干函数,由于相干函数在频率域中深刻地沟通了两个过程各频率分量之间的关系,根据相干函数可评价在分析的频率范围内结果的可靠性。由图可知,在 100～500Hz 范围内,相干函数值大于 0.95,说明在这个频率范围内所得结果是可靠的。

由以上分析可知:在各种分析方法中,互谱具有较好的重复性和可靠性,是分析骨声振动频谱特性、评价骨折愈合程度的较好的方法。此项工作的开展,为骨科临床研究提供极有价值的参数,为无损、量化、客观诊断骨折愈合程度提供了重要方法。

参考文献

1　北京医科大学附属医院骨外科. 骨科临床及 X 线检查的基本知识和方法. 人民卫生出版社, 1976

2　V. R. Singh. Acoustical imaging techniques for bone studies. Applied Acoustics, 1989; 27: 117

3　L. D. M. Nokes et al, Natural frequency of frature fragments in assessment of tibial fracture healing. J. Biomed. Eng. 1984; 6: 227

4. H. M. Doemland et al, Assessment of fracture healing by spectral analysis. J. Med. Eng. Tech. 1986; 10(4): 180

4　钱盛友. 骨组织中声传输特性的分析与研究. 陕西师范大学硕士论文, 1994