

多孔生物医用材料三维模型的建立及有限元分析

王小平¹ 黄志勤² 杨林² 崔福斋¹

- (1. 清华大学材料科学与工程系 北京 100084;
2. 上海硅步科学仪器有限公司 上海 200030)

摘要: 多孔材料是生物材料中一个重要的类型。利用显微镜只能观察到多孔材料表面或某一截面的信息, 而无法获得全面的三维孔隙结构信息。本文以珊瑚羟基磷灰石人工骨修复材料为例, 根据 Micro-CT 断层图像, 利用 Simpleware 软件进行三维重建, 得到了这种多孔材料的计算机模型。该模型能够清晰地反映出材料的孔隙结构。对一段珊瑚羟基磷灰石模型进行了有限元分析, 结果显示多孔材料中的应力分布, 在此基础上解释了材料的破坏原因。本文还预测了这种多孔材料三维建模方法可能的应用领域。

关键词: 多孔材料; Micro-CT 图像; 三维重建; 有限元分析

Establishment of 3-D Model and Finite Element Analysis of Porous Biomaterials

WANG Xiaoping¹, HUANG Zhiqin², YANG Lin², CUI Fuzhai¹

- (1. Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;
2. Shanghai Gaitech Scientific Instruments Co. Ltd., Shanghai, 200030)

Abstract: Porous material is an important type of biomaterials. By using microscopes, one can get the information of surface or cross section of the material, but not the 3-D pore structure. In this paper, computerized models of coralline hydroxyapatite bone grafts were obtained from Micro-CT images by 3-D reconstruction using Simpleware, which gives detailed information of the pore structure. Then a section of the porous material was analyzed using finite element method. The stress distribution in the porous material was revealed, on basis of which reasons of material failure was explained. The authors also predicted possible applications of the method of porous material modeling.

Keywords: porous material, Micro-CT image, 3-D reconstruction, finite element analysis

多孔材料是生物医用材料中一个重要的类型, 例如目前研究较多的组织工程框架材料。对这类多孔材料的研究, 目前多采用光学显微镜或扫描电镜观察。但是, 利用显微镜只能观察到材料表面或某一截面的孔隙分布信息, 而无法获得材料三维孔隙结构的信息。为了建立多孔材料的三维模型, 需要根据断层图像, 利用三维重建技术获得。目前, 研究较多的是利用 CT 断层扫描和三维重建, 建立骨^[1-4]或牙的三维模型^[5,6]。Micro-CT 扫描精度更高, 因此能够用来研究多孔材料^[7,8]。本文尝试运用 Micro-CT 断层扫描, 利用 Simpleware 软件进行三维重建, 来建立多孔的珊瑚羟基磷灰石人工骨修复材料的三维计算机模型, 在此基

作者简介: 王小平, 男, 博士后, 主要研究方向: 生物材料; 通讯作者: 杨林, Email: service@gaitech.net

础上利用有限元法对多孔材料进行力学分析。

1 珊瑚人工骨三维模型的建立

图 1 所示的是多孔的珊瑚羟基磷灰石人工骨修复材料, 是利用 10 倍的光学显微镜拍摄的图片。本文中所用的珊瑚人工骨是由广州军区总医院骨科提供。本课题组与上海硅步科学仪器有限公司合作, 利用 Micro-CT 对珊瑚人工骨进行断层扫描, 扫描精度为 $20\mu\text{m}$, 得到一系列的材料断层图像, 然后利用 Simpleware 软件进行三维重建。



图 1 多孔的珊瑚羟基磷灰石骨修复材料

Simpleware 是英国 Simpleware 公司推出的世界领先的建模软件, 包括图像处理与 CAD 模型生成模块 ScanIP、网格生成模块⁺ScanFE 和⁺ScanCAD 模型植入及定位配准模块⁺ScanCAD, 它可以将三维扫描图像 (MRI、CT、MicroCT 等) 转换成应用于计算机辅助设计 (CAD)、有限元分析 (FEA)、快速原型 (RP) 等领域的高质量的计算机模型。利用 Simpleware 软件建立的珊瑚人工骨的三维模型如图 2。从图中可以看出, 该模型能够清晰地反映出珊瑚人工骨的孔隙结构。

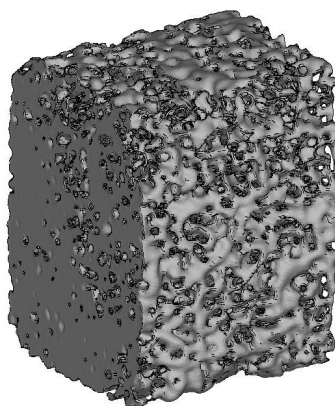


图 2 根据 Micro-CT 图像重建的一段珊瑚人工骨模型

2 多孔材料的力学分析

利用有限元法对多孔材料进行力学分析。为了减少问题的复杂性, 重新建立了一个较小的珊瑚人工骨模型, 如图 3。图中珊瑚人工骨的横截面近似是一个边长为 3 mm 的正方形, 模型的厚度为 0.4 mm。从珊瑚人工骨的横截面上, 可以看出一边是多孔的, 而另一边是致密的, 如图中虚线所示。

Simpleware 软件生成的有限元网格模型可直接输出到常见的商业有限元分析软件, 如 ANSYS, ABAQUS, NASTRAN 等。材料模型选择线弹性各向同性。假设珊瑚受到均匀的压缩载荷, 边界条件如图 4 所示。由于珊瑚人工骨上下表面是不规则的, 载荷无法直接施加在上下表面, 因此在材料上下部各选择

一条水平线，在水平线附近选择一定数量的节点，在这些节点上施加载荷。具体的做法是，在有限元模型上部水平线附近选择了 93 个节点，每个节点施加 0.1 N 的压力，下部水平线附近选择了 131 个节点，使这些节点固定。

利用有限元法进行分析计算，结果如图 5。图中上下部矩形区域内的高应力，是由于在节点施加载荷，引起应力集中而形成的。从图中可以看出，应力从左到右逐渐增加。在左边多孔的区域，应力较低，但在孔口处应力很高。在珊瑚人工骨横截面右边致密的区域，应力较高，表明压缩载荷主要由致密区域承担。

根据这种应力分布的状况，可以预测当受到压力时珊瑚人工骨的破坏方式。当受到压力时，在受力点附近引起应力集中，可能使材料局部压溃。另外，材料内部孔口处应力很高，是裂纹产生的源头，裂纹的扩展可能导致材料整体断裂。

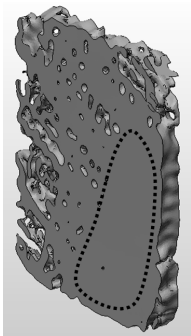


图 3 珊瑚人工骨的几何模型

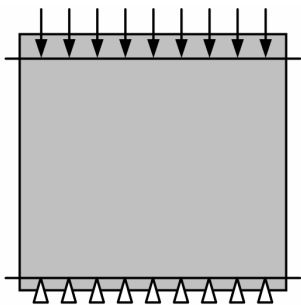


图 4 有限元模型的边界条件

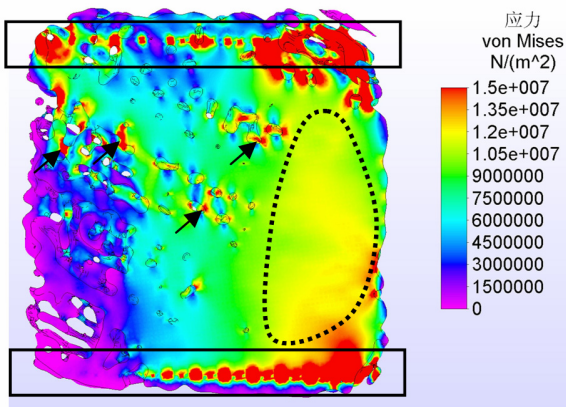


图 5 珊瑚人工骨横截面上的应力分布

3 讨论

在研究材料或结构的力学性能时,一般认为材料是具有一定几何形状的均匀的连续体,即材料力学研究中所做的连续性假设和均匀性假设;结构是由多个连续均匀的元件相互连接而成,这些元件可以是同一种材料,也可以是不同的材料。材料和结构是不同的,但两者又是相对的。本文建立珊瑚人工骨的三维模型,考虑了材料的孔隙结构,实际上是把珊瑚人工骨作为一种结构来研究,对其进行微观的力学分析。

本文中应用的这种建立多孔材料三维模型的方法,可以进一步推广到建立人骨的高精度的三维模型。以人体四肢长骨为例,骨干部位主要是密质骨,而两端靠近关节的部位表面是密质骨,中间是松质骨。以往骨模型的建立,一般是采用普通的 CT 扫描,精度比较低,只能反映出骨的外形和骨髓腔的轮廓^[1-4]。Micro-CT 断层扫描仪精度能够达到 5 μm ,因此根据 Micro-CT 图像和 Simpleware 三维重建技术能够区分密质骨和松质骨,建立高精度的骨的三维模型^[8]。

利用 Micro-CT 断层扫描和 Simpleware 三维重建技术,能够建立多孔生物材料的三维模型。这项技术可能在以下领域得到应用:

1. 根据多孔材料的三维计算机模型,分析和计算材料的表面积、孔隙率等表征参数^[9];
2. 在三维模型基础上,做有限元分析,研究多孔材料的力学性能;
3. 建立人骨的高精度的三维模型,模型中能够区分松质骨和密质骨。在此基础上,利用有限元法进行力学分析,为骨科生物力学的研究和骨科医疗器械的研制提供资料;
4. 在人骨的高精度模型基础上,利用快速原型技术,构建出与人骨孔隙结构相同的多孔材料,作为骨缺损的修复材料^[10]。

致谢

本文中珊瑚人工骨的三维模型是由上海硅步科学仪器有限公司提供,特此致谢。

参考文献

- [1] 彭亮,曾小丽,白净. 基于 CT 数据的股骨三维有限元建模方法. 清华大学学报, 2007, 47(3): 416-419.
- [2] 马如宇,铁瑛,薛文东等. 基于螺旋 CT 构建人体骨盆三维有限元模型. 医用生物力学, 2004, 19(3): 180-183.
- [3] 叶铭,张绍祥,王成焘. 力学虚拟人骨组织曲线曲面模型重建技术. 医用生物力学, 2006, 21(3): 212-216.
- [4] 傅栋,靳安民. 应用 CT 断层图像快速构建人体骨骼有限元几何模型的方法. 中国组织工程研究与临床康复, 2007, 11(9): 1620-1623.
- [5] 张美超,刘阳,刘则玉等. 利用 Mimics 和 Freeform 建立中国数字人上颌第一磨牙三维有限元模型. 医用生物力学, 2006, 21(3): 208-211.
- [6] 梁铭,刘维贤,韩清凯等. 基于 CT 标准格式文件建立上颌第一磨牙有限元模型. 医用生物力学, 2005, 20(4): 243-246.
- [7] 张扬,彭晓峰. 多孔材料内部结构的微 CT 扫描仪分析. 工程热物理学报, 2005, 20(5): 850-852.
- [8] 彭江,汪爱媛,孙明学等. 股骨头骨坏死样本空间结构的 Micro-CT 评估. 中华创伤骨科杂志, 2007, 9(3): 263-268.
- [9] 汤国华,杨俊和,张琢. 一种定量分析多孔材料孔隙结构的新方法. 煤炭转化, 2004, 27(1): 71-75.
- [10] 张庆福,吕春堂,周中华. 快速原型技术在颅颌面整复中的应用. 国外医学生物医学工程分册, 2005, 28(1): 10-13.