

考虑载荷特性的骨重建力学调控机制

马宗民¹⁾ 李淑娴

(大连大学机械工程学院, 辽宁大连 116622)

摘要 骨组织具有适应变化力学环境的能力. 通过分析骨组织适应力学环境的调控机制, 吸纳工程强度设计准则思想, 提出考虑载荷特性的骨重建力学调控机制, 探讨载荷特性对力学激励的影响, 对牙槽骨“张力区骨增生和压力区骨吸收”的现象进行分析和数值模拟. 结果表明考虑载荷特性的骨重建力学调控机制是合理的, 是骨重建力学调控机制理论的补充和完善.

关键词 骨重建, 力学调控机制, 载荷特性, 强度设计

中图分类号: R318 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-14-155

THE MECHANISM OF BONE REMODELLING WITH CONSIDERATION OF LOAD CHARACTERISTICS

MA Zongmin¹⁾ LI Shuxian

(Mechanical Engineering College, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

Abstract The bone has the ability to adapt to an altered mechanical environment. Through the analysis of the bone remodelling and based on the engineering strength design criteria, a mechanism of the bone remodelling with consideration of the load characteristics is proposed. The effect of the load characteristics on the mechanical stimulus is discussed and the bone formation of the alveolar bone in the area under a tensile stress and the bone resorption in the area under a pressure are analyzed and simulated. It is shown that the mechanism of bone remodelling with consideration of the load characteristics is reasonable and it can improve the mechanism of bone remodelling.

Key words bone remodeling, mechanical regulation, load characteristics, strength design

骨是一种有生命的生物材料, 有许多生理功能. 除参与钙磷代谢平衡外, 骨最重要的生理功能是支持、运动和保护^[1-2]. 从工程观点看, 骨结构功能最重要的特征在于它的强度和刚度^[1].

骨能够对其形状、骨量、以及内部结构进行不断地自我调整和自我更新, 使其本身在质量、数量、分布(结构)和微结构完整性等 4 个方面都以最佳状况来适应变化的力学环境, 这种功能称为骨的功能适应性^[1-4].

骨的功能适应性通过一种叫骨重建的生理机制完成. 骨重建是骨吸收过程和骨形成过程耦合的协调过程, 分别由破骨细胞和成骨细胞完成^[1].

骨重建中主要存在 2 种调控机制: 生物调控机制和力学调控机制^[1,5]. 其中, 力学调控机制是维护骨量的关键调控机制, 确保其强度和刚度适应力学环境. 力学激励是力学调控机制中的调控因子. 很多学者分别以应变、应力、应变能、应变速率、应变能密度、疲劳微裂纹等作为力学激励建立了多个骨

2014-04-22 收到第 1 稿, 2014-07-14 收到修改稿.

1) 马宗民, 大连大学讲师, 博士. E-mail: mzm9909@163.com

引用格式: 马宗民, 李淑娴. 考虑载荷特性的骨重建力学调控机制. 力学与实践, 2015, 37(2): 223-226

Ma Zongmin, Li Shuxian. The mechanism of bone remodelling with consideration of load characteristics. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(2): 223-226

重建理论模型^[2]。但这些模型均不能很好地解释牙槽骨“张力区骨增生和压力区骨吸收”的特性。

本文通过对骨重建力学调控机制内涵的分析, 吸纳工程强度设计准则的思想, 提出考虑载荷特性的骨重建力学调控机制, 对载荷特性对力学激励的影响进行了探讨, 并对牙槽骨“张力区骨增生和压力区骨吸收”的特性进行了分析和数值模拟。

1 骨重建的生物力学调控机制

骨组织对其周围力学环境具有很强的适应性。骨组织具有维持其一定内部力学环境的能力。现实生活中骨的力学环境是在不断地变化, 当力学环境变化后, 原有的骨量分布已不能适应, 某些部位负荷增加而骨量不足, 某些部位负荷减少而骨量过多。这种情况引起了骨量的重新分布, 使骨量不足的部位增加骨量, 使骨量过多的部位减少骨量。这一过程使骨量再分布重新适应新的力学环境。这种引起骨量重新分配而适应力学环境的机制称为骨的“力学调控系统”(mechanostat)^[6-8]。

力学调控机理: 骨内存在一个网状信号传导系统, 当外界载荷引起骨骼变形或微裂纹, 骨细胞(力学感应细胞)感受力学环境的变化, 将力学信号转换为生物化学信号并传到骨表面, 激活骨重建生理调节机制, 引发破骨细胞骨吸收并偶联成骨细胞骨形成^[9]。

力学调控系统的运作机制: 在力学调控系统中, 力学因素是主要的控制因素。它决定骨组织是否需要改变、改变部位和改变的方向(骨量增加或减少)。骨量的增减取决于外力作用的幅度, 这是因为骨组织内部对外力作用的敏感性所决定的, 这种敏感性称为阈值或平衡稳态值。阈值是骨适应力学环境的力学量, 它们是这个调控系统的灵敏度, 称为阈值。正是这个调控系统的作用, 使骨结构总是力图适应力学环境, 并以最优的结构形式适应力学环境。外力作用的幅度以力学激励来表示, 是骨重建理论中力学环境的表征量, 是力学调控系统的调控因子, 通过与阈值对比, 判断其在力学调控系统中所处区域, 以确定骨平衡的方向, 来调整骨量增加或减少。

通过对骨重建力学调控机理和运作机制的分析, 骨重建力学调控机制的内涵包括: (1) 骨组织对力学环境具有监测能力, 并通过力学激励进行表达; (2) 骨组织具有自适应调节能力, 通过力学激励与阈值对比, 判断骨组织骨量是超出外力作用需

要, 还是不能满足外力作用需要, 进而决定骨平衡调控的方向和调控程度, 维护骨量以确保骨的强度和刚度满足力学需要。

从工程强度设计观点看, 骨重建力学调控机制的本质是骨组织作为一种材料的自适应优化设计。骨组织作为一种有生命的材料通过生理调节机制骨重建实现自我优化设计。力学激励是力学环境表征量, 反映了载荷对骨组织的作用效应, 可通过应变、应力、应变能、应变速率、应变能密度、疲劳微裂纹等表达, 阈值类似于工程强度设计准则中的许用应力或许用安全因子。

2 工程强度设计准则^[10-11]

材料的失效形式主要有3种: 断裂、屈服和疲劳。断裂和屈服是静载荷作用的主要失效形式, 疲劳是动载荷交变应力作用的主要失效形式。材料的失效形式决定着适用的强度理论。

材料失效主要与材料性质和载荷特性有关。材料主要有脆性材料和塑性材料2种。脆性材料通常以断裂形式失效, 塑性材料通常以屈服形式失效。应力状态等载荷特性也影响着材料的失效形式。无论是塑性或脆性材料, 在三向拉应力相近的情况下, 将以断裂形式失效。在三向压应力相近的情况下, 将以屈服形式失效。每种形式的失效, 都有适用的强度理论。

因此, 在材料确定的情况下, 应力状态等载荷特性决定着适用的强度理论。

3 考虑载荷特性的骨重建生物力学调控机制

通过上述分析, 基于骨重建生物力学调控机制思想, 吸纳工程强度设计准则思想, 提出考虑载荷特性的骨重建生物力学调控机制: 骨组织是一种具有自我优化设计能力生物材料; 力学激励是决定骨重建方向(骨量增加或减少)的调控因子; 力学激励是衡量骨组织受力和变形程度的量, 可以采用应力、应变或应变能密度等表征; 如设定不同载荷特性骨重建阈值不变, 则力学激励应考虑载荷特性的影响; 或者骨重建阈值随不同载荷特性调整, 则力学激励无需考虑载荷特性的影响。

本研究采取第一种处理方式, 骨重建阈值不考虑载荷特性的影响, 力学激励考虑载荷特性的影

响,取相当应力作为力学激励.

$$\psi = \begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \sigma_1 - \sigma_3 \\ \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \\ \sigma_1 - \frac{[\sigma_t]}{[\sigma_c]}\sigma_3 \end{cases}$$

式中, ψ 为力学激励, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力, 且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, μ 为材料泊松比, $[\sigma_t]$ 为材料的抗拉许用应力, $[\sigma_c]$ 为材料的抗压许用应力. 根据载荷特性应力状态选取合适的力学激励计算公式.

4 牙槽骨“张力区骨增生和压力区骨吸收”现象的分析和数值模拟

牙槽骨“张力区骨增生和压力区骨吸收”的特性主要表现在临床口腔正畸中. 牙齿在受到正畸力作用后, 牙齿两侧牙槽骨一侧表现为张力区, 受拉; 一侧表现为压力区, 受压. 在张力区和压力区分别选取代表性单元^[1,5], 应力状态见图 1. 两侧应力同为正畸力产生, 因此大小相等, 设定应力 $\sigma = 0.06 \text{ MPa}$ ^[12].

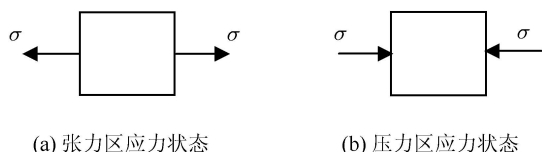


图 1 牙槽骨受到正畸力作用后应力状态

张力区应力: $\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$

第一强度理论为适用强度设计准则, 则

$$\psi_t = \sigma = 0.06$$

压力区应力: $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\sigma$

莫尔强度理论为适用强度设计准则, 则

$$\psi_c = \frac{[\sigma_t]}{[\sigma_c]}\sigma = 0.02$$

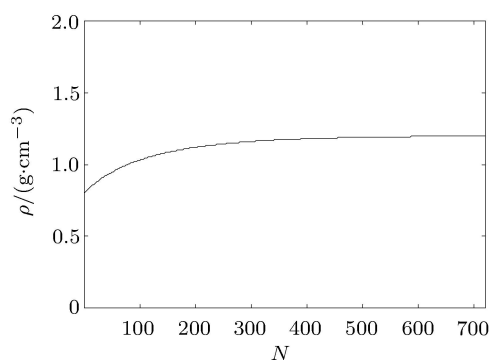
根据文献^[13-14], 骨的抗拉强度小于抗压强度, 取 $\frac{[\sigma_t]}{[\sigma_c]} = \frac{1}{3}$.

ψ_0 为骨重建平衡阈值, 本文设定为 0.04 MPa , 则: $\psi_c < \psi_0 < \psi_t$. 显然, 压力区则会处于废用区, 张力区处于过载区, 从而导致压力区骨吸收和张力区骨增生.

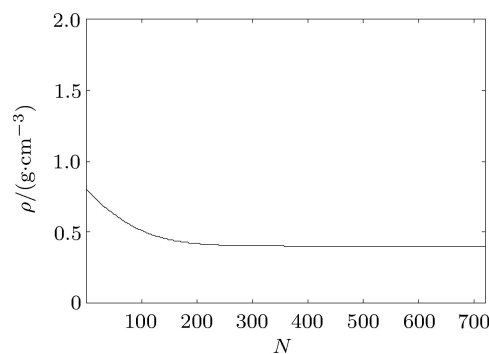
应用骨重建控制方程 $\frac{d\rho}{dt} = B(S - K)$ 进行数值模拟^[15]. 式中 ρ 为骨的表现密度, B 为骨重建速率常数, S 为力学激励, 本文取相当应力 ψ , K 为骨重建平衡态的力学激励, 取为 ψ_0 . 根据文献^[16], 设定初始密度 $\rho_0 = 0.8 \text{ kg/cm}^3$.

5 结果和讨论

从数值模拟结果(图 2)可以看出, 张力区有明显的骨生成, 压力区有明显的骨吸收, 迭代前 300 步变化显著, 后来逐步平缓, 表明骨重建由不平衡态逐步进入平衡态.



(a) 张力区结果



(b) 压力区结果

图 2 骨重建模拟结果

本文创新之处在于: 骨重建力学调控机制中的力学量: 骨重建阈值或力学激励引入载荷特性的影响, 体现了骨重建是骨骼作为一种材料的强度自适应优化设计, 反映了骨重建最重要的特征在于它的强度和刚度, 与骨骼支持、运动和保护的结构功能相适应. 同时也充分表明了是骨重建的力学调控机制维护骨量的关键调控机制.

本理论较好地解释了牙槽骨“张力区骨增生和压力区骨吸收”临床生理现象, 可对临床口腔正畸

治疗提供理论指导,是骨重建力学调控机制的补充.

本文仅讨论了静载荷对力学激励的影响,但人体受到的生理载荷主要是动载荷;同时考虑到骨骼的有生命这一特殊性,因此对于骨骼的破坏机制、力学感知机理及其自适应调控运作机制等方面还需要深入研究.

参考文献

- Pivonka P, Buenzli PR, Scheiner S, et al. The influence of bone surface availability in bone remodelling—a mathematical model including coupled geometrical and biomechanical regulations of bone cells. *Engineering Structures*, 2013, 47: 134-147
- 马宗民. 各向异性骨再造理论模型及骨质疏松模拟研究. [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2005
- 王璠. 骨质疏松与力学. *力学与实践*, 2004, 26(3): 94-95
- 杨桂通. 探索人体奥秘的古老故事——生物力学孕育期一瞥. *力学与实践*, 2004, 26(2): 80-83
- Stefan S, Peter P, Christian H. Coupling systems biology with multiscale mechanics, for computer simulations of bone remodeling. *Comput Methods Appl Mech Engrg*, 2013, 254: 181-196
- Frost HM. Bone“mass”and the“mechanostat”: a proposal. *Anat Rec*, 1987, 219: 1-9
- Frost HM. Skeletal structural adaptations to mechanical usage (SATMU): 2. Redefining wolff’s law: the remodelling problem. *Anat Rec*, 1990, 226: 414-422
- Frost HM. Bone’s mechanostat: a 2003 update. *Anat Rec*, 2003, 275A: 1081-1101
- 朱东, 马宗民, 麻文焱等. 带有力学调控系统的各向异性骨再造模型. *生物医学工程学杂志*, 2006, 23(3): 525-529
- 刘鸿文主编. 材料力学 I (第 5 版). 北京: 高等教育出版社, 2011
- 刘鸿文主编. 材料力学 II (第 5 版). 北京: 高等教育出版社, 2011
- 钱英莉. 正畸力作用下尖牙移动过程的模拟研究. [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2003
- 吴淑琴. 股骨皮质骨生物力学特性研究. *中北大学学报: 自然科学版*, 2012, 33(2): 216-220
- 赵宝林, 程杰平, 马洪顺等. 股骨头松质骨力学性质实验研究. *医用生物力学*, 2004, 18(4): 234-238
- Weinans H, Huiskes R, Grootenboer HJ. The behavior of adaptive bone-remodeling simulation models. *Journal of Biomechanics*, 1992, 25(12): 1425-1441
- 宋帮勇, 樊瑜波. 以主应力作为力学激励的骨再造方程. *生物医学工程学杂志*, 2004, 21 (4S): 117-118

(责任编辑: 刘希国)

(上接第 217 页)

- 余天堂. 不连续问题的扩展有限元法分析. *船舶力学*, 2007, 11(5): 716-722
- 茹忠亮, 朱传锐, 赵洪波. 裂纹扩展问题的改进 XFEM 算法. *工程力学*, 2012, 29(7): 12-23
- 王敏. 基于扩展有限元法的平板模型裂纹扩展研究. [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2011
- 钟万勰. 弹性力学求解新体系. 大连: 大连理工大学出版社, 1995
- 唐立民, 褚致中, 邹贵平等. 混合状态哈密顿元的半解析解和叠层板的计算. *计算结构力学及应用*, 1992, 9(4): 347-360
- Belytschko T, Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 45(5): 601-620
- 唐立民. 弹性力学的混合方程和 Hamilton 正则方程. *计算结构力学及应用*, 1991, 8(4): 343-350
- 蔡宇. 复合材料层合板脱层损伤研究. [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2008
- 胡海昌. 弹性力学的变分原理及其应用. 北京: 科学出版社, 1981
- Moler C, Van Loan C. Nineteen dubious ways to compute the exponential of a matrix. *SIAM Review*, 1978, 20(4): 801-836
- Mergheim J, Kuhl E, Steinmann P. A finite element method for the computational modelling of cohesive cracks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005, 63(2): 276-289
- Moës N, Dolbow J, Belytshenko T. A finite element method for crack growth without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 46(1): 131-150
- 庄茁, 柳占立, 成斌斌等. 扩展有限单元法. 北京: 清华大学出版社, 2012
- 丁遂栋, 孙利民. 断裂力学. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 王宇航, 聂建国. 基于断裂力学的组合梁栓钉疲劳性能. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2009, 49(9): 35-38

(责任编辑: 刘希国)