

沙疗温度对骨重建实验的影响及传热数值模拟研究

尼加提·外力, 居来提·买提肉孜*, 李艳娜, 田伟

(新疆大学机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

【摘要】 目的 研究沙疗温度对骨重建实验的影响及传热数值模拟研究。**方法** 采用 CT 扫描的手段分别进行 4 次扫描(建立实验对象 OA 模型前后各 1 次、进行沙疗第 1 周和第 2 周后各 1 次)。将扫描数据导入 MIMICS 软件, 分析了各股质层骨量的变化, 将肌肉、股骨和骨髓, 装配后划分网格, 把建立的三维模型的 STL 格式导入到 COMSOL 软件进行传热模拟及分析温度场产生的应力对骨重建的影响。**结果** 分析 4 次 CT 扫描数据的变化和热应力模拟, 在沙疗温度产生的热应力环境下, 软质骨体积减少, 而密、硬质骨体积增加。传热数值模拟很好的体现了大腿及股骨部位的温度分布。**结论** 沙疗温度对股骨产生的热应力对骨重建起促进作用。

【关键词】 沙疗; 传热; 骨密度; 热应力; 数值模拟

【中图分类号】 Q95-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1005-4847(2017) 02-0181-05

Doi:10.3969/j.issn.1005-4847.2017.02.012

Effects of sand therapy temperature on the bone reconstruction and numerical study on the heat transfer

Nijat Wali, Jurat Matrozi*, LI Yan-na, TIAN Wei

(College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

【Abstract】 Objective To investigate the effects of sand therapy temperature on bone reconstruction and numerical study on the heat transfer. **Methods** CT scan imaging was performed respectively for four times (before and after OA model was set up, and after the first and second weeks during the sand therapy). Import the scan data to MIMICS software, and the changes of femoral bone mass layer were analyzed. After combining the muscle, femur, bone marrow and meshing, the established three-dimensional model of the STL format was introduced into the COMSOL software for heat transfer simulation and effect of stress on bone remodeling induced by temperature field. **Results** Changes of four CT scan data were analyzed. The soft bone volume was reduced, while the dense and hard bone volume were increased. Numerical simulation on the heat transfer showed the temperature distribution of the thigh and the femur. **Conclusions** The thermal stress produced by sand therapy temperature exert promoting effect on the femur bone remodeling.

【Key words】 Sand therapy; Heat transfer; Bone density; Thermal stress; Numerical modeling

Corresponding author: Jurat Matrozi, E-mail: jurat@xju.edu.cn

埋沙疗法, 简称沙疗是吐鲁番劳动人民利用当地具有特殊的气候条件和地理条件来创造的一种治疗各种骨病的方法。经过相关领域的骨病学专家学者对维医沙疗的实验研究, 发现维医沙疗对关节炎、颈椎腰腿痛、风湿、骨质疏松等各种骨病有很明显的疗效。骨性关节炎(osteoarthritis, OA)即退行性骨

关节病(degenerative joint disease), 是在力学因素和生物学因素共同作用下, 软骨细胞、细胞外基质及软骨下骨三者间分解和合成代谢失衡的结果^[1]。据美国关节炎基金会 1973 年的研究表明, 美国患骨性关节炎的人数已经达到 2000 万, 年龄 45~65 岁之间的患者占 75% 以上^[2]。骨性关节炎虽然造成死

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(编号:81160542)。

[作者简介] 尼加提·外力(1988-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 生物力学。E-mail: 1120684680@qq.com

[通讯作者] 居来提·买提肉孜(1972-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 生物力学。E-mail: jurat@xju.edu.cn

亡率不是很高,但是造成严重的关节疼痛和功能障碍。药物可以防治关节炎,但是价格昂贵,治疗周期时间长而产生较多的副作用,因而限制了其作用。沙疗可以有效地加速局部血液循环,其过程可能是热沙的作用,使得血管扩张、血液循环改善,促进骨代谢。破骨细胞是在骨吸收中起主要作用的细胞,目前认为破骨细胞主要来源于骨髓中造血干细胞的前破骨细胞,其分化发育信号由成骨细胞调节^[3]。应力是骨骼在我们的日常活动中所承受的最常见的一种物理因子,它对于机体的骨骼代谢及骨健康状况有着十分重要的影响。应力应变对骨生长和股重建的影响是当前骨科学和应用生物材料领域的研究热点,相关研究集中在骨折愈合方面^[4]。已有不少研究结果证实:局部骨组织细胞的细胞因子的异常表达可能是力学刺激调节骨转换并且对骨量影响的最终因素之一。力学刺激对于骨代谢的影响机制十分复杂,包括其对于骨形成、骨吸收以及骨转换等各个方面。骨细胞通过感受力学刺激,产生具有合成代谢功能的细胞因子如胰岛素样生长因子 I (IGF-1) 等以旁分泌方式作用位于骨表面的成骨细胞增加成骨作用^[5]。Reed 等^[6]发现血浆 IGF-1 水平与成骨细胞活性指标有密切的相关,而 Zhang 等^[7]则证实力学刺激可能通过调节 IGF-1 的表达对骨代谢起作用。骨髓基质干细胞向成骨细胞转化过程需要经过分化、增殖、矿化、休止四个阶段。

本文通过建立兔骨关节炎三维模型在模拟吐鲁番沙疗场建立的沙疗实验^[8],对兔股骨进行 CT 扫描分析、传热模拟和热应力模拟后考察了沙疗产生的热应力对骨重建的影响及进行了数值模拟。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验动物

清洁级成年雄性新西兰兔 10 只,10 月龄,体重为 (3.8 ± 0.2) kg,由新疆医科大学动物实验中心提供【SCXK(新)2011-0003】,饲养及组织取材均于新疆医科大学实验动物中心实验设备内进行【SYXK(新)2011-0001】。本实验所有操作均符合中华人民共和国《实验动物管理条例》。

1.1.2 仪器与试剂

上海生工 (Sangon Biotech) 生物工程公司提供

的 3% 木瓜蛋白酶 (papain)。Siemens/Emotion 6 排螺旋 CT, CT 扫描主要参数:最小断层厚度为 0.3 mm,CT 图像像素为 512×512 (Pixel); Mimics17.0 软件;惠普 HP Compaq 8200 Elite Microtower 计算机。

1.2 方法

1.2.1 建立 OA 模型

将实验对象饲养两周使之适应饲养环境之后,进行第 1 次扫描,第 7 天对兔右腿膝关节腔内注射浓度为 3% 剂量为 0.3 mL 的木瓜蛋白酶,建立 OA 模型。第 14 天再进行第 2 次扫描,进行沙疗 1 周后 (第 21 天) 再进行第 3 次扫描,沙疗第 2 周后 (第 28 天) 再进行第 4 次扫描。

我们研究的是沙疗温度产生的热应力对股重建的影响,所以在其皮肤下组织温度具体的分布和传热情况,是我们研究讨论的重点。因此我们将大腿分割为肌肉层、骨骼和骨髓三部分,其阈值范围分别为肌肉 ($-203 \sim 147$), 骨骼 ($148 \sim 3701$), 骨髓 ($-185 \sim 60$)。

1.2.2 治疗方法

在新疆大学南校区建立的四季沙疗室中,利用夜间采用双面加热的方法对沙体加热,使其温度与吐鲁番沙疗场沙疗温度基本吻合。沙疗进行时间为每天的北京时间 12:30 ~ 13:00 和 18:00 ~ 18:30 对 OA 兔进行两次各 30 min 的 14 d 沙疗,并在埋沙治疗时,对膝关节处沙疗的温度进行每 5 min 1 次的测量和记录,得到的沙疗温度范围是 $38.5 \sim 45^\circ\text{C}$, 这温度范围是跟吐鲁番沙疗所的沙疗温度基本吻合。

2 结果

2.1 骨质骨量的变化

利用 Mimics 软件处理 CT 扫描的数据所得三维模型,从直观的角度可以发现,密度最大的硬质骨的外形上,在沙疗前后硬质骨的分布情况有明显的变化规律。(见图 1)。

由图 2 可知,第 1 次 CT 扫描数据是给实验兔打药前的各股质层的骨量扫描数据,打药后的第 7 天进行第 2 次扫描时发现软质骨的体积增加,密质骨和硬质骨的体积减少,这说明兔右腿股骨患关节炎。进行沙疗后第 3、4 次扫描发现软质骨的体积减少,密质骨和硬质骨的体积增加。

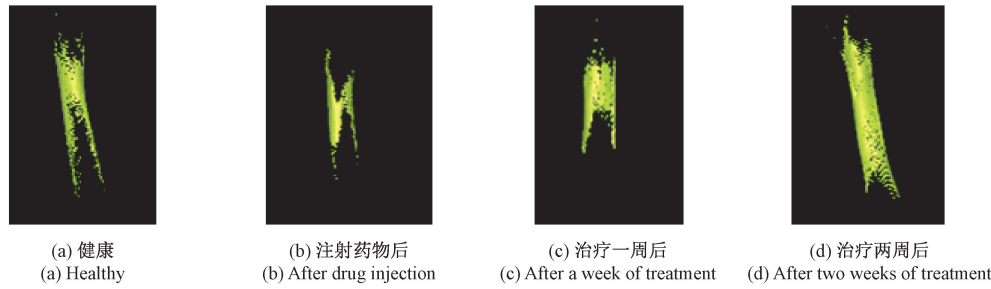


图 1 沙疗前后硬质骨分布情况

Fig. 1 Distribution of hard bone before and after sand treatment

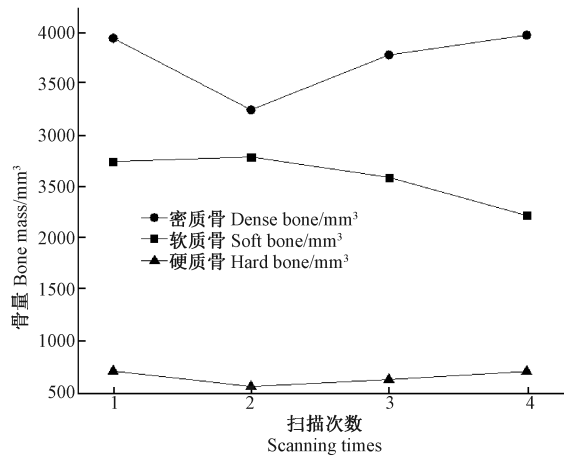


图 2 四次扫描后各股质层骨量的变化折线图

Fig. 2 The changes of bone mass in each layer of the femur after four times of scanning

2. 2 传热数值模拟

2. 2. 1 传热理论

皮肤的传热属于生物传热学的研究范围 , 与工

程材料的传热很不一样。 Pennes 的灌流组织传热模型考虑了血管的传热作用和生命体代谢产热因素, 形式比较简单, 但能较好地反映生物传热的过程, 是目前使用最多的生物传热模型。 本文采用它对生物组织的传热过程进行分析和仿真, 其方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{bio}$$

$$Q_{bio} = \rho_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_{met}$$

式中 Q 为外部热源项, Q_{bio} 反映了出入控制体的血流所传输的热量。 Q_{met} 为新陈代谢热源。 ρ [Kg·K] 表示生物组织密度, C_p [J/(kg·K)] 为生物组织的常压热容, ρ_b 表示血液密度, T 表示温度, t 表示时间, ω_b 为血液灌注率, k 为组织的热导率。 C_b 为血液比热容, T_b 为动脉血的温度。

2. 2. 2 三维模型的建立及传热仿真

利用 Comsol 软件对生物组织传热给物理参数 (表 1、2) 进行了有限元仿真。 图 3、4 是整个 OA 模型 (肌肉、股骨、骨髓) 和股骨的温度分布云图。

表 1 材料属性

Tab. 1 Material properties

生物材料属性 Biological material properties	常压热容/J/(kg·K) Atmospheric heat capacity	密度/kg/m ³ Density	导热系数 W/(M·K) Thermal conductivity
肌肉 Muscle	4000	1000	0. 34
股骨 Bone	1300	1790	0. 43
骨髓 Bone marrow	3960	1100	0. 515

表 2 生物热参数

Tab. 2 Biothermal parameters

生物热参数 Biot thermal parameters	动脉血液温度/[K] Arterial blood temperature	血液比热容/J/(kg·K) The specific heat of the blood	血液灌注率/L/s Blood perfusion rate	血液密度/kg/m ³ Blood density
肌肉 Muscle	311. 65	4000	3. 5e-3	1060
股骨 Bone	311. 65	1300	4. 2e-7	1060
骨髓 Bone marrow	311. 65	3960	7. 5e-6	1060

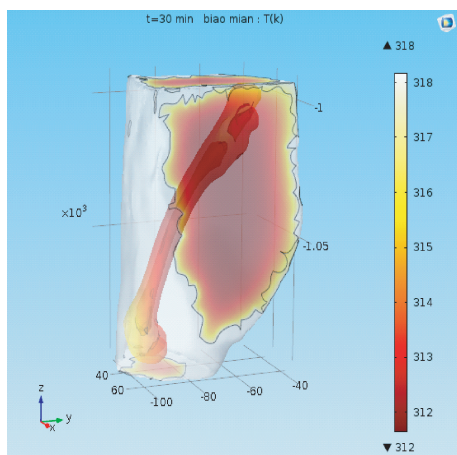


图3 整个模型的温度分布云图

Fig. 3 Temperature distribution of the whole model

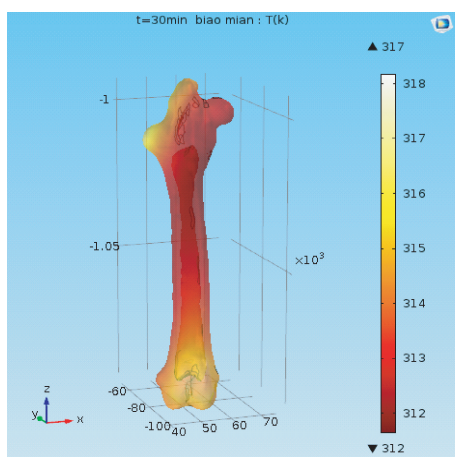


图4 股骨的温度分布云图

Fig. 4 Temperature distribution of the femur

由股骨三维模型的温度分布图可知股骨在肌肉层薄的区域温度较高(达到 316.65 K),股骨的中间部位由于肌肉层较厚,在肌肉组织内的生物调节下,热量传到股骨中间部位就相对较小(311.65 K)及温度的变化是不均匀的,导致其部位温度相对较低。

2.2.3 温度场对股骨产生的应力

本文利用 Comsol 软件对骨组织设置杨氏模量为 1.4×10^{11} Pa,泊松比为 0.3,热膨胀系数为 0.1×10^{-6} 等热应力参数^[9]后进行了热应力分析。

由模拟结果图可知,传热温度产生的热应力主要影响在骨髓上,传热温度为 312.65 K 时最大应力为 2.21×10^{-8} Pa,传热温度为 316.65 K 时最大应力为 2.43×10^{-8} Pa。这说明,沙疗过程中传热温度产生的热应力值随传热温度增强。

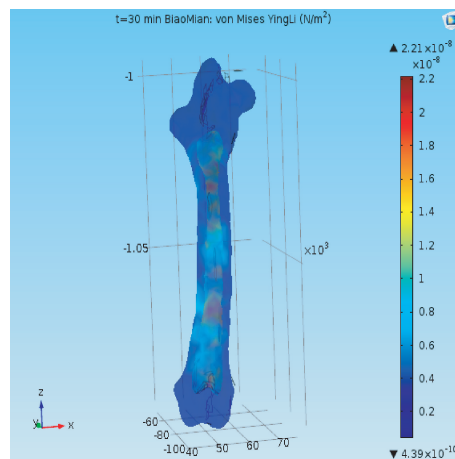


图5 温度 312.65K 的应力分布云图

Fig. 5 Stress distribution of temperature 312.65 K

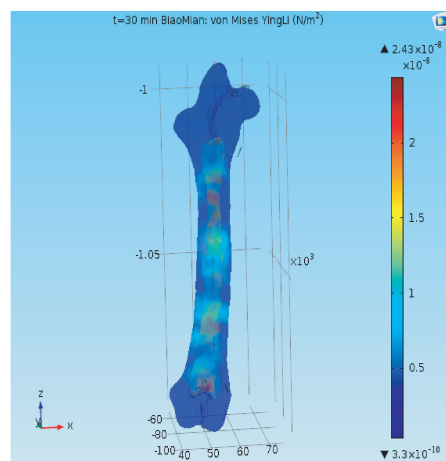


图6 温度 316.15K 的应力分布云图

Fig. 6 Stress distribution of temperature 316.65 K

3 讨论

硬质骨的三维模型变化规律可以推断:在股骨硬质骨分布的区域,沙疗传热通过对离子的作用,影响酶的活性,进而影响这些酶参加新陈代谢反应。同时也可加速局部血液循环,血管扩张、血液循环改善。通过这些作用从而影响了硬质骨的增多及分布面积增大。

骨组织的重建与应力的关系是生物力学一个重要研究方向。研究骨骼的重建机理、骨生长与应力关系的理论,就必然深刻地了解骨生理重建的实际过程,可以帮助我们从基础的角度去理解骨骼的重建和生长机理,对在医学上的采用有着广泛的前途,对于矫形外科、骨伤的治疗等很多方面都有着重要的作用^[10, 11]。早在 1884 年, Wolff 就提出了一个很重要的假说,通常称为 Wolff's law:“骨在需要的环

境就生长,不需要的环境就吸收”^[12]。含义是,骨的生长、吸收、重建、消亡都与骨的受力状态有密切地关系。这重要的假说给我们指出了力学与生命之间的密切关系。力学应力对软骨内骨化和骨生长过程产生影响的,这理论是很早以前提出的。早在 19 世纪 Hueter-Volkmann 定律提出压力抑制对软骨生长而被张力加快骨生长^[13]。这个简单但是重要的基本假设与大量实验研究的结果是基本一致的,并且成为当代临床治疗领域的理论基础。

总之,沙疗中传热作为重要因素,沙疗温度对股骨产生的热应力促进骨髓基质细胞向成骨细胞分化的能力,成骨细胞不断形成类骨质,破骨细胞又不断溶解吸收骨、抑制软质骨的生长而加快软质骨成为密、硬质骨的速度,通过这些活动来完成骨重建。

参 考 文 献

- [1] 向川. 软骨细胞凋亡与骨关节炎 [J]. 国外医学免疫学分册, 2003, 26(2): 110-114.
- [2] 29th Annual Conference for Engineering, Medicine and Biology. Boston, Massachusetts [J]. 1976 (Huskes et al, 1976).
- [3] Hofbauer LC, khosla S, Dunstan CR, et al. The roles of osteoprotegerin and osteoprotegerin ligand in the paracrine regulation of bone resorption [J]. J Bone Miner Res. 2000, 15: 2-12.
- [4] 吴琳,王禄增,哈斯达来,等. 应力对大段骨缺损修复影响的实验兔磨削探讨 [J]. 中国实验动物学报, 2011, 19(1): 26-28.
- [5] Lean JM, Jagger CJ, Chambers TJ, et al. Increased insulin-like growth factor ImRNA expression in rat osteocytes in response to mechanical stimulation [J]. Am J Physiol, 1995, 268: 318-327.
- [6] Reed BY, Zerwekh JE, Sakhaee, et al. Serum IGF-I is low and correlated with osteoblastic surface in idiopathic osteoporosis [J]. J Bone Miner Res, 1995, 10: 1218-1224.
- [7] Zhang R, Supowit SC, Klein GC, et al. Rat tail suspension reduces messenger RNA leve for growth factor and osteopontin and decreases the osteoblastic differentiation of bone marrow stromal cells [J]. J Bone Mineer Res, 1995, 10: 415-423.
- [8] 居来提·买提肉孜, 孔春元, 迪丽娜尔·马合木提. 室内人工兽医沙疗实验系统的建立 [J]. 中国科技论文在线, 2008, 5 月.
- [9] 冯元桢. 生物力学 [M]. 科学出版社, 1983: 240-245.
- [10] Thomas M, Slobodan T, Robert WM. Cartilage stresses in the human hip joint [J]. Transact ASME, 1994, 2(16): 10-18.
- [11] Torvi DA, Dale JD. A finite element model of skin subjected to a flash fire [J]. Transact ASME, 1994, 8(116): 250-255.
- [12] Wolff JL. The law of bone remodeling [M]. P Maque, R Furlong. Springer. Berlin. 1986: 100.
- [13] Ionnotti J, Kuhn J, Lipiello L, et al. Growth Plate and Bone Development. Orthopaedic Basic Science [M]. S. Simon. American Academy of Orthopaedic Surgeons. 1994: 185-217.

[收稿日期] 2016-07-26