

正常股骨头与坏死股骨头松质骨的蠕变特性：45°方向取样比较☆

于涛¹, 孙长江¹, 马洪顺²

Creep characteristics of cancellous bone at 45° between normal and necrotic femoral head

Yu Tao¹, Sun Chang-jiang¹, Ma Hong-shun²

Abstract

BACKGROUND: The creep characteristics of cancellous bone from necrotic femoral head are important for clinical artificial joint replacement. Therefore, it is necessary to study mechanical properties of cancellous bone at 45° direction.

OBJECTIVE: To compare creep properties of normal femoral head and necrotic femoral head at 45° direction based on three-parameter model established creep equation.

METHODS: A total of 8 normal and 8 necrotic femoral heads were used. The cancellous bone was harvested at 45° and subjected to creep test on electronic universal testing machine. With simulated temperature field of human body temperature at 36.5 °C, stress was imposed on the samples by an increase of 5%/s for 7 200 seconds. 100 experimental data were collected, and stress relaxation equation was calculated using three-parameter model.

RESULTS AND CONCLUSION: The creep curve of the femoral head of normal and necrotic changes was exponential relation. Changes were fast in the first 600 seconds, and strain increased slowly with time, finally entered into balance stage. 7 200 s creep of cancellous bone from necrotic femoral head was less than normal femoral head cancellous bone. Three-parameter model calculation is simple and can well fit the creep of changes in the femoral head. The establishment of such idealized equation quantitatively shows poor visco-elasticity of the necrotic femoral head.

Yu T, Sun CJ, Ma HS. Creep characteristics of cancellous bone at 45° between normal and necrotic femoral head. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2010;14(17): 3131-3134. [http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

摘要

背景: 临床人工关节置换和人工关节的研究都需要了解坏死股骨头松质骨以不同方向取样的蠕变力学特性, 因此有必要以45°方向取样对松质骨的力学性质进行研究。

目的: 以三参数模型建立了蠕变方程, 比较正常股骨头和坏死股骨头45°方向蠕变性质。

方法: 正常股骨头和坏死股骨头各8个, 沿股骨头松质骨45°方向取样, 在电子万能试验机上进行蠕变实验。模拟人体体温在36.5 °C的温度场下, 以0.1 MPa/s的应力增加速度对标本施加常应力, 设定时间为7 200 s, 采集100个实验数据。采用三参数模型计算蠕变方程。

结果与结论: 正常股骨头和坏死股骨头蠕变曲线均以指数关系变化的, 在最初600 s应变变化较快, 随时间延长应变缓慢上升, 最后进入平衡阶段。坏死股骨头松质骨7 200 s蠕变量小于正常股骨头松质骨。提示三参数模型计算简便, 能很好地拟合股骨头的45°方向蠕变变化, 通过建立这种理想化的方程, 可以定量说明坏死股骨头的黏弹性较差。

关键词: 正常股骨头; 坏死股骨头; 股骨头松质骨; 45°方向; 蠕变特性; 骨组织构建

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2010.17.023

于涛, 孙长江, 马洪顺. 正常股骨头与坏死股骨头松质骨的蠕变特性: 45°方向取样比较[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(17):3131-3134. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

0 引言

骨力学是生物力学的重要分支, 研究骨组织在外力作用下力学特性和骨受力后的生物效应是对骨组织评定的一种可靠方法。国内外学者对密质骨的力学性质做了大量研究^[1-5], 对于松质骨的研究进展一直较慢。近年来由于临床医学上许多重要基础问题需要解决, 才使得关于松质骨的研究屡见报道^[6-11]。关于松质骨的黏弹性国内外学者也有一定的报道^[12-15]。

股骨头坏死一直是国内外学者们研究的重要课题。明确股骨头松质骨的黏弹性力学性质对预防和治疗股骨头坏死, 对人工关节的研究具有重要意义。鉴于实际的临床需要, 研究正

常股骨头和坏死股骨头松质骨黏弹性的力学性质是很有必要的, 并具有重要的现实意义。

正常股骨头和坏死松质骨不同方向蠕变特性比较尤为引起人们的兴趣。以往多研究正常股骨头和坏死股骨头纵向和横向蠕变特性, 正常股骨头和坏死股骨头松质骨45°方向取样和纵向、横向取样蠕变力学特性会相似吗? 基于此设想, 实验采集国人男性青年尸体正常股骨头标本和股骨头坏死股骨头标本, 以三参数模型建立了蠕变方程, 比较正常股骨头和坏死股骨头45°方向蠕变性质。

通过正常股骨头和坏死股骨头松质骨蠕变力学特性研究, 可以明确正常股骨头和坏死股骨头松质骨蠕变的时间变化规律, 定量的得出两组试样的7 200 s蠕变量。这些问题一旦阐明,

¹China-Japan Union Hospital of Jilin University, Changchun 130031, Jilin Province, China; ²Department of Engineering Mechanics, Nanling Campus of Jilin University, Changchun 130022, Jilin Province, China

Yu Tao☆, Doctor, Associate professor, China-Japan Union Hospital of Jilin University, Changchun 130031, Jilin Province, China

Correspondence to: Ma Hong-shun, Professor, Department of Engineering Mechanics, Nanling Campus of Jilin University, Changchun 130022, Jilin Province, China mahs@jlu.edu.cn

Received: 2009-11-17 Accepted: 2010-01-20

¹ 吉林大学中日联谊医院, 吉林省长春市 130031; ² 吉林大学南岭校区工程力学系, 吉林省长春市 130022

于涛☆, 男, 1975年生, 吉林省长春市人, 汉族, 2003年吉林大学中日联谊医院毕业, 博士, 副教授, 主要从事骨科学临床与生物力学。

通讯作者: 马洪顺, 教授, 吉林大学南岭校区工程力学系, 吉林省长春市 130022 mahs@jlu.edu.cn

中图分类号: R318
文献标识码: B
文章编号: 1673-8225 (2010)17-03131-04

收稿日期: 2009-11-17
修回日期: 2010-01-20
(20091117002/M·A)

对于彻底揭示股骨头松质骨损伤的机制具有理论意义。

1 材料和方法

设计: 对比观察。

时间及地点: 实验于2006-05-20/30在吉林大学力学实验中心完成。

材料: 实验标本由白求恩医科大学解剖教研室提供: 国人青年新鲜尸体正常股骨头8个, 均为男性, 年龄20~30岁, 坏死股骨头8个, 均为男性, 年龄30~60岁。将标本装入塑料袋中, 密封后置于-20℃冰箱内保存备用。

实验前取出标本, 在常温下解冻, 沿股骨头松质骨45°方向和纵向以线锯切割试样, 试样尺寸为长28~30 mm, 宽28~30 mm, 高21.2~22.0 mm。

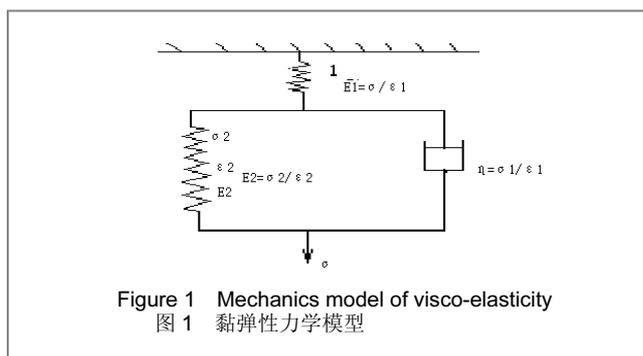
实验装置采用日本岛津AG-10TA自动控制电子万能试验机, 载荷通过载荷传感器传递, 应变通过机器的应变单元传递, 实验结束后, 计算机自动输出实验结果。

实验方法:

蠕变实验: 将试样的原始尺寸输入到控制机器的计算机内。骨组织的黏弹性主要来自熵的改变, 因而不存在惟一状态, 这种组织会随加载-卸载循环次数而变化, 经多次重复才能达到稳定状态。实验对每个试样反复加卸载20次^[16-20], 使循环曲线达到平稳。预调处理后进行实验。

将试样置于装有pH值为7.4的生理盐水的有机玻璃缸内, 将有机玻璃缸置于试验机工作台上, 试样上端与试验机压头接触, 试验机带有-35~250℃环境温箱, 可自动调节温度和保持恒温。实验模拟正常人体温在(36.5±0.5)℃温度场下进行, 以0.1 MPa/s的应力增加速度对标本施加常应力。正常组应变达到0.189%, 应力达到1.19 MPa, 病态组应变达到0.288%, 应力达到1.19 MPa时使应变保持恒定, 应力随时间改变, 不断下降。计算机程序设定从时间 t_0 开始采集数据, 每0.6 s采集一个数据, 采集10次, 之后每10 s采集一个数据, 采集40次; 之后每136 s采集一个数据, 采集50次, 共采集100个数据, 历时7 200 s。

蠕变方程计算: 采用三参数模型^[21]计算蠕变方程, 见图1。



其中:

σ 为系统的总应力;

ϵ 为总应变;

$E_1 \epsilon_1$ 为弹簧1的弹性系数及应变;

$E_2 \epsilon_2$ 为弹簧2的弹性系数及应变;

$\sigma_1 \sigma_2$ 为弹簧2及黏壶的应力;

η 为黏壶的黏性系数;

$\dot{\epsilon}_2 = \frac{d\epsilon_2}{dt}$ 是 ϵ_2 对时间 t 的一阶导数即为应变率。

由三参数模型可知有如下关系^[21]:

$$\begin{cases} \epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 & (1) \\ \sigma = \sigma_1 + \sigma_2 & (2) \end{cases}$$

当应力恒定时 $\sigma = \sigma_0$, 可求得应变与时间的关系式——蠕变方程的一般表达式。

由于 $\sigma = \text{常数}$, 则 $\frac{d\sigma}{dt} = 0$, 当 $t=0$ 时, $\epsilon = \epsilon_0 = 0$, 可以写成为 $\frac{d\epsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta} \epsilon = \frac{\sigma_0}{\eta} (1 + \frac{E_2}{E_1})$ 。

对上式两边同乘积分因子 $e^{\frac{E_2}{\eta} t}$ 积分得:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (3)$$

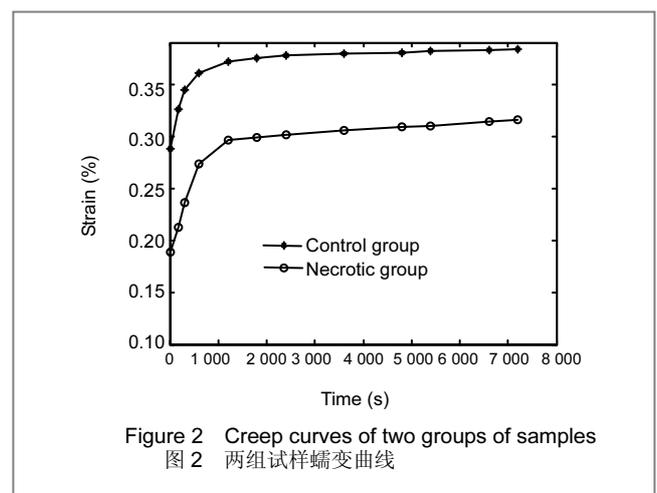
式中 $\tau = \frac{\eta}{E_2}$, (3)式即谓蠕变方程的一般表达式。

主要观察指标: ①蠕变曲线。②蠕变方程计算结果。

设计、实施、评估者: 设计为第一作者, 实验实施为第一作者和第三作者, 评估为第二作者。

2 结果

2.1 蠕变曲线 两组试样蠕变曲线见图2。



由图2可以看了同正常对照组7 200 s蠕变量大于坏死组。

2.2 蠕变方程计算结果

正常组当由 $t=0$, $\epsilon(0) = 0.189\%$ 得 $E_1 = 150 \text{ MPa}$

当 $t=(\infty)$ 时, $\epsilon(\infty) = 0.316\%$ 代入方程(3)得 $E_2 = 180 \text{ MPa}$

当 $t=600\text{ s}$, $\varepsilon=0.273\%$ 代入方程(3), $\tau=5.1\text{ s}$

所以

$$\varepsilon(t)=0.256\%+0.81\% \left(1-e^{-\frac{t}{5.1}}\right) \quad (4)$$

(4)式为正常组股骨头松质骨蠕变方程。

股骨头坏死组当由 $t=0$, $\varepsilon(0)=0.288\%$ 得 $E_1=178\text{ MPa}$

当 $t(\infty)$ 时, $\varepsilon(\infty)=0.384\%$ 代入方程(3)得 $E_2=198\text{ MPa}$

当 $t=600\text{ s}$, $\varepsilon=0.361\%$ 代入方程(3), $\tau=6.3\text{ s}$

所以

$$\varepsilon(t)=0.56\%+0.69\% \left(1-e^{-\frac{t}{6.3}}\right) \quad (5)$$

(5)式为病态组股骨头松质骨蠕变方程。

3 讨论

本实验对正常股骨头和坏死股骨头松质骨标本在同一方向取样, 试样的几何尺寸一致, 采用具有自动控制应力应变增加速度和使应力保持恒定的电子万能试验机, 将试样置于生理盐水中解决了试样的保湿问题, 试验机带有环境温箱, 实现了模拟关键问题。本实验比较正常股骨头和坏死股骨头松质骨的蠕变力学特性, 目的是获得正常股骨头和坏死股骨头松质骨的蠕变特性。实验方法也可以对不同部位松质骨进行比较。实验方法有以下几种特征: ①记录了正常股骨头和坏死股骨头松质骨在同一实验速度, 同一环境温度下蠕变力学特性。②按正常和坏死分组, 均为男性, 避免了性别产生的偏倚。③以统计分析和 t 检验方法评估实验数据的误差, 通过实验得出的数据可以定量的比较两组实验的蠕变力学特性。实验结果表明, 正常对照组股骨头松质骨7 200 s蠕变量为0.128%, 坏死组股骨头松质骨7 200 s蠕变量为0.096%, 正常对照组7 200 s蠕变量显著大于坏死组7 200 s蠕变量($P < 0.05$)。

孙树东等^[22]对老年股骨头坏死松质骨对骨应力松弛力学性质影响进行了研究, 其对正常股骨头和坏死股骨头松质骨在45°方向取样, 观察了应力松弛数据和曲线, 观察了应力与时间的变化规律。得出了正常和病态股骨头松质骨具有不同的应力松弛特性的结论。赵宝林等^[23]对正常和老年股骨头坏死松质骨进行了拉伸与压缩实验研究, 观察了二组试样的拉伸与压缩最大载荷、最大应力、最大应变等, 得出了正常股骨头和坏死股骨头松质骨具有不同的拉伸和压缩力学特性的结论。陈雷等^[24]研究了正常股骨头和坏死股骨头松质骨纵向应力松弛蠕变方程。以回归分析的方法处理实验数据, 得出了归一化应力松弛函数和归一化蠕变函数方程。麻文焱

等^[21]对正常股骨头和坏死股骨头松质骨纵向蠕变方程比较研究, 其与以往研究不同的是蠕变实验施加载荷1 kN。以三参数模型处理实验数据, 得出了两组标本的蠕变方程。高峰等^[26]以三参数模型构建了正常股骨头和坏死股骨头松质骨的应力松弛方程。

麻文焱等^[25]对正常股骨头和坏死股骨头松质骨纵向取样, 7 200 s蠕变量为0.19%, 坏死组7 200 s蠕变量为0.13%。本实验对正常股骨头和坏死股骨头松质骨45°方向取样, 试样的几何尺寸、实验温度、实验速度预调处理, 施加应力均相同, 目的是为比较对正常股骨头和坏死股骨头松质骨在纵向和45°方向取样7 200 s蠕变量有否不同。本实验结果表明45°方向取样, 正常对照组7 200 s蠕变量小于纵向取样正常对照组, 45°方向取样坏死组7 200 s蠕变量也小于纵向取样坏死组。说明股骨头松质骨为各向异性黏弹性材料。

松质骨的黏弹性力学性质和胶原蛋白含量及骨小梁的排列方向稀疏程度等有关。近年来对胶原纤维的排列方向及结构与力学性能之间的相关性研究进一步提示, 胶原纤维是一个影响骨力学性能极为重要的因素, 这是由于胶原纤维是基质的主要成分, 羟基磷灰石一般沉积于胶原纤维头尾之间的空隙内, 换言之, 胶原纤维的排列方向决定了羟基磷灰石沉积位置, 二者高度有序的结合使骨具有良好力学性能^[9], 骨胶原组织主要由3种纤维组成, 即弹性纤维、胶原纤维和网状纤维。胶原纤维使胶原组织具有一定的强度和刚度, 弹性纤维使胶原组织具有一定的延伸能力。分析认为坏死股骨头松质骨由于股骨头坏死, 作用于股骨头的应力分布改变, 应力分布不均匀, 股骨头局部产生应力集中, 造成挤压, 使骨小梁断裂, 排列紊乱, 破坏了其黏弹性力学特性, 造成蠕变量丢失, 所以7 200 s蠕变量小于正常对照组。

4 参考文献

- [1] Kuhn JL, Goldstein SA, Choi K, et al. Comparison of the trabecular and cortical tissue moduli from human iliac crests. *J Orthop Res*. 1989;7(6):876-884.
- [2] Martin RB, Ishida J. The relative effects of collagen fiber orientation, porosity, density, and mineralization on bone strength. *J Biomech*. 1989;22(5):419-426.
- [3] Ma HS, Zhang ZH, Shiyuan Jishu yu Shiyuanji. 1990;30(2):37-40,42. 马洪顺, 张泽涵. 人长管状骨生物力学性能[J]. 试验技术与试验机, 1990,30(2):37-40,42.
- [4] Yang SD, Ning YJ. Guangzhou: South China University of Technology Press. 1990:524. 杨思德, 宁英吉. 人骨断裂的实验研究生物力学研究和应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1990:524.
- [5] Ma HS, Wang YC, Han HW. Beijing: Peking University Press. 1992:365. 马洪顺, 王玉臣, 韩辉武. 人髌骨蠕变实验研究第七届全国实验力学学术会议论文集(一)[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992:365.
- [6] Gibson LJ. The mechanical behaviour of cancellous bone. *J Biomech*. 1985;18(5):317-328.
- [7] Ashman RB, Rho JY. Elastic modulus of trabecular bone material. *J Biomech*. 1988;21(3):177-181.
- [8] Keaveny TM, Hayes WC. A 20-year perspective on the mechanical properties of trabecular bone. *J Biomech Eng*. 1993; 115(4B):534-542.
- [9] Linde F, Nørgaard P, Hvid I, et al. Mechanical properties of trabecular bone. Dependency on strain rate. *J Biomech*. 1991; 24(9):803-809.

- [10] Martens M, Van Audekercke R, Delpont P, et al. The mechanical characteristics of cancellous bone at the upper femoral region. J Biomech. 1983;16(12):971-983.
- [11] Zhao BL,Zhang W, Ma HS. Shiyuan Jishu yu Shiyuanji. 2002;42(3):80-81.
赵宝林, 张外, 马洪顺. 股骨松质骨弯曲实验研究[J]. 试验技术与试验机, 2002, 42(3):80-81.
- [12] Schoenfeld CM, Lautenschlager EP, Meyer PR Jr. Mechanical properties of human cancellous bone in the femoral head. Med Biol Eng. 1974;12(3):313-317.
- [13] Linde F, Hvid I. Stiffness behaviour of trabecular bone specimens. J Biomech. 1987;20(1):83-89.
- [14] Zilch H, Rohlmann A, Bergmann G, et al. Material properties of femoral cancellous bone in axial loading. Part II: Time dependent properties. Arch Orthop Trauma Surg. 1980;97(4):257-262.
- [15] Sun SD,Zhao CF, Ma HS. Shengwu Yixue Gongcheng Yanjiu. 2007;26(2):128-130,134.
孙树东, 赵长福, 马洪顺. 腰椎L4松质骨应力松弛蠕变方程[J]. 生物医学工程研究, 2007, 26(2):128-130, 134.
- [16] Wang XY, Li P, Ma HS. Beijing Shengwu Yixue Gongcheng. 2007; 26(3):316-317.
王溪原, 李鹏, 马洪顺. A L C 和 M C L 拉伸力学性质实验研究[J]. 北京生物医学工程, 2007, 26(3):316-317.
- [17] Li P, Meng GW, Ma HS. Shengwu Yixue Gongcheng Yanjiu. 2006; 25(4):202-205.
李鹏, 孟广伟, 马洪顺. 膝关节前交叉韧带与后交叉韧带粘弹性实验研究[J]. 生物医学工程研究, 2006, 25(4):202-205.
- [18] Luo M, Meng GW, Ma HS. Beijing Shengwu Yixue Gongcheng. 2007;26(4):418-421.
罗民, 孟广伟, 马洪顺. 骨质疏松动物模型治疗的黏弹性实验研究[J]. 北京生物医学工程, 2007, 26(4):418-421.
- [19] Wang YF, Gao M, Ma HS. Beijing Shengwu Yixue Gongcheng. 2007;26(5):535-538.
王玉发, 高明, 马洪顺. 拇展肌与拇收肌移位吻合术前、后黏弹性实验研究[J]. 北京生物医学工程, 2007, 26(5):535-538.
- [20] Wang GQ, Wang ML, Ma HS, et al. Shengwu Yixue Gongcheng Yanjiu. 2007;26(2):121-124.
王桂琴, 王墨林, 马洪顺, 等. 大鼠颈总动脉与脑膜中动脉粘弹性测试[J]. 生物医学工程研究, 2007, 26(2):121-124.
- [21] Gao F, Yang YG, Ma HS. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2008;12(48):9415-9418.
高峰, 杨有庚, 马洪顺. 三参数模型计算正常与病态股骨头松质骨的应力松弛方程[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 12(48):9415-9418.
- [22] Sun SD, Zhao CF, Ma HS. Zhongguo Laonianxue Zazhi. 2007; 27(21):2125-2126.
孙树东, 赵长福, 马洪顺. 老年股骨头坏死松质骨对骨应力松弛力学性质影响研究[J]. 中国老年学杂志, 2007, 27(21):2125-2126.
- [23] Zhao BL, Gao M, Ma HS. Zhongguo Laonianxue Zazhi. 2008;28(8):767-768.
赵宝林, 高明, 马洪顺. 正常与老年股骨头坏死松质骨拉伸与压缩实验研究[J]. 中国老年学杂志, 2008, 28(8):767-768.
- [24] Chen L, Gao M, Ma HS. Shengwu Yixue Gongcheng Yanjiu. 2006; 25(3):162-165.
陈雷, 高明, 马洪顺. 正常与病态股骨头松质骨纵向应力松弛蠕变方程[J]. 生物医学工程研究, 2006, 25(3):162-165.
- [25] Ma WY, Li P, Ma HS. Shengwu Yixue Gongcheng Yanjiu. 2008; 27(4):281-283.
麻文焱, 李鹏, 马洪顺. 正常与病态股骨头松质骨蠕变方程的比较研究[J]. 生物医学工程研究, 2008, 27(4):281-283.

来自本文课题的更多信息一

利益冲突: 无利益冲突。

课题评价: 国内外学者对正常股骨头松质骨的黏弹性力学性质进行了一定研究, 但对股骨头坏死松质骨, 尤其是以45°方向取样报道较少。临床人工关节置换和人工关节的研究都需要了解病态股骨头松质骨以不同方向取样的蠕变力学特性, 课题成员前期已完成股骨头松质骨纵向和横向取样的蠕变特性研究, 本文是前期研究的继续。

课题评估的“金标准”: 生物材料不同于金属材料, 个体差异大, 目前尚无国家或国际标准来评价生物材料的力学实验结果, 尚需做大量的实验, 积累大量的数据后, 才有可能制定标准。

设计或课题的偏倚与不足: 样本数量少, 实验数据有一定的离散, 但对临床还是有一定的参考价值。

提供临床借鉴的价值: 以三参数模型构建了正常股骨头与坏死股骨头松质骨的蠕变方程。定量的得出两组标本应力与时间的变化规律, 对于人工假体新材料的研究和设计具有重要意义。

咨询Email: crter50000@163.com
xsb03@crter.org

《中国组织工程研究与临床康复》杂志 (CRTER)

CRTER “生物材料” 栏目组稿重点

<p>7 纤维状及含纤维结构的生物材料 关键词: 纤维、静电纺丝、医用纺织品</p> <p>8 丝蛋白基生物材料 关键词: 蚕丝蛋白基材料、创伤修复、细胞相容性、组织诱导性</p> <p>9 血液净化材料 关键词: 血液净化、血浆分离、吸附剂</p> <p>10 组织工程及支架材料: 神经再生与修复 关键词: 周围神经、中枢神经、神经损伤、神经再生与修复、神经干细胞</p> <p>11 纳米生物材料 关键词: 纳米生物材料、表面、评价</p> <p>12 医用金属材料 关键词: 医用金属材料、金属表面改性、金属成型、金属植入器械</p>	<p>13 生物活性骨水泥材料 关键词: 骨修复、生物活性、骨水泥、类骨磷灰石、磷酸钙</p> <p>15 骨科内植物与骨替代材料 关键词: 人工骨替代材料、细胞-载体材料、抗菌性</p> <p>17 血管内支架材料 关键词: 药物洗脱支架、再狭窄</p> <p>14 生物陶瓷材料 关键词: 生物陶瓷、生物陶瓷涂层、无机纳米颗粒、生物学评价、临床应用</p> <p>16 牙科与颅颌面生物材料 关键词: 牙科材料、牙种植体、牙科陶瓷、牙齿防龋材料、颌面修复材料、临床应用</p> <p>18 组织诱导性生物材料 关键词: 材料诱导软骨再生、材料诱导神经再生、材料诱导血管内膜再生</p>
---	--

www.crter.org