

纳米碳管处理磷酸钙骨水泥的生物相容性及其强度和韧性**

董伟强¹, 白波¹, 张妹江¹, 叶建东²

Biocompatibility and biomechanical properties of calcium phosphate bone cement treated by carbon nanotube

Dong Wei-qiang¹, Bai Bo¹, Zhang Mei-jiang¹, Ye Jian-dong²

Abstract

BACKGROUND: Treatment for osteoporosis and bone defects needs a lot of bone repair materials. Calcium phosphate bone cement, as one of commonly used materials for bone repair, has great brittleness, so clinicians have been looking forward to develop a bone repair material with better biocompatibility and biomechanics.

OBJECTIVE: To evaluate the biocompatibility and *in vitro* biomechanical properties of a new calcium phosphate bone cement treated by carbon nanotube.

METHODS: *In vitro* hemolysis, cytotoxicity, acute systemic toxicity and hypersensitivity tests were performed on a new calcium phosphate cement according to the requirements given in Biological Standards for Implanted Biomaterials ISO 10993 by International Organization for Standardization. Thoracolumbar vertebral bodies (T₁₂~L₄) were harvested from six embalmed cadavers. The flexional compression fractures were experimented. After restoring the height of the vertebral bodies by the percutaneous kyphoplasty, the cement was respectively injected with calcium phosphate cement treated by carbon nanotube and common calcium phosphate cement. The extreme load, compressive strength, stiffness were obtained.

RESULTS AND CONCLUSION: ① The hemolysis rate of the new cement-extracted solution in human was 1.81%, without hemolytic crisis. The cytotoxicity index of the 929 cell was graded as zero. The mouse acute systemic toxicity, mouse inherent toxicity and guinea-pig hypersensitivity were negative in extracting stock solution. ② After vertebroplasty, the extreme load, compressive strength and stiffness of calcium phosphate cement treated by carbon nanotube were significantly higher than those of common calcium phosphate cement. The biocompatibility of the new calcium phosphate cement treated by carbon nanotube is good enough to meet the requirements given in Biological Standards for Implanted Biomaterials by International Organization for Standardization, and the strength and stiffness of the new cement are better than common calcium phosphate cement.

Dong WQ, Bai B, Zhang MJ, Ye JD. Biocompatibility and biomechanical properties of calcium phosphate bone cement treated by carbon nanotube. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2010;14(29): 5363-5366.

[http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

¹First Affiliated Hospital, Guangzhou Medical College, Guangzhou 510120, Guangdong Province, China;
²South China University of Technology, Guangzhou 510120, Guangdong Province, China

Dong Wei-qiang★, Master, Chief physician, First Affiliated Hospital, Guangzhou Medical College, Guangzhou 510120, Guangdong Province, China dwqdoctor@163.com

Supported by: Health Bureau of Guangdong Province No. A 2007249*

Received: 2010-03-23
Accepted: 2010-05-30

摘要

背景: 由于骨缺损和骨质疏松等治疗需要大量的骨修复材料。但常用的骨修复材料之一——磷酸钙骨水泥存在脆性大等缺陷, 所以临床工作者一直期盼研制一种生物相容性和生物力学更好的骨科修复材料。

目的: 观察以纳米碳管处理的磷酸钙骨水泥材料的生物相容性和体外生物力学性能。

方法: 根据国际标准化组织颁布的 ISO10993 系列, 对新型骨水泥材料进行体外溶血试验、细胞毒性试验、急性毒性试验、皮肤过敏性试验; 取 6 具老年尸体胸腰段脊柱标本(T₁₂~L₄) 进行体外生物力学性能测试, 建立压缩性骨折模型后采用球囊扩张后凸椎体成形术恢复高度, 分别注射填充纳米碳管处理的磷酸钙骨水泥和普通磷酸钙骨水泥, 再进行前屈压缩, 测量极限载荷、抗压强度、刚度。

结果与结论: ①新型材料浸提原液对健康人红细胞溶血率为 1.81%, 无溶血现象。材料浸提液对 L929 细胞毒性分级为 0 级, 无细胞毒性。材料浸提原液未引起小鼠急性毒性反应、小鼠遗传毒性及豚鼠过敏反应。②填充纳米碳管处理的磷酸钙骨水泥组成形后的极限载荷、抗压强度、刚度均高于普通磷酸钙骨水泥组($P < 0.05$)。结果表明以纳米碳管处理的磷酸钙骨水泥材料生物相容性符合国际规定的体内植入物的生物学评价标准, 其强度和韧性较普通骨水泥有较大的提高。

关键词: 纳米碳管; 磷酸钙骨水泥; 生物相容性; 生物力学; 骨科生物材料

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2010.29.011

董伟强, 白波, 张妹江, 叶建东. 纳米碳管处理磷酸钙骨水泥的生物相容性及其强度和韧性[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(29):5363-5366. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

¹ 广州医学院第一附属医院, 广东省广州市 510120; ² 华南理工大学, 广东省广州市 540641

董伟强★, 男, 1968 年生, 广东省增城市人, 汉族, 2006 年广州医学院毕业, 硕士, 主任医师, 主要从事关节外科方面的研究。dwqdoctor@163.com

中图分类号:R318
文献标识码:B
文章编号:1673-8225 (2010)29-05363-04

收稿日期:2010-03-23
修回日期:2010-05-30
(20100323019/M·Y)

0 引言

磷酸钙骨水泥是生物医学领域常用的骨科材料, 具有良好的生物相容性和骨传导性, 但磷酸钙骨水泥在材料学上仍存在很多问题, 例如强度低、脆性大^[1-4], 难以满足临床的高标准要求。为克服其强度低、脆性大的问题, 更好地服务临床, 本实验以生物矿化的纳米碳

管(carbon nanotubes,CNTs)对磷酸钙骨水泥进行改性处理, 处理后水化的材料为纳米材料, 它既保持了磷酸钙骨水泥的良好生物相容性, 又增加了材料的强度和韧性^[5]。

1 材料和方法

设计: 材料的体外生物相容性和体外生物力学性能测试。

时间及地点: 实验于2004-09/2009-07在广州医学院第一附属医院和华南理工大学生物工程系实验室完成。

材料:

主要试剂和仪器	来源
CNTs	深圳纳米港有限公司
部分结晶磷酸钙(PCCP)和磷酸氢钙(DCP)	上海回赫维化工有限公司
自制油浴锅	华南理工大学
贴壁生长的 L929 细胞	中山大学医学院动物实验室提供
(小鼠结缔组织成纤维细胞)	

方法:

生物矿化CNTs的制备: 首先将1.2 g CNTs加入5 mL 60%硝酸溶液中, 超声分散20 min。然后在华南理工大学自制搭建的油浴锅中加热至预定温度。盛放浓硝酸的三口烧瓶一口连接回流装置, 当CNTs在140 °C浓硝酸中回流8 h后开始冷却, 过滤、洗涤至中性, 在50 °C真空干燥30 h。然后, 将硝酸处理过碳纳米管浸泡于37 °C的模拟生物溶液中7 d。最后样品经去离子水和丙酮洗涤, 干燥制备出生物矿化的CNTs。

新型骨水泥的制备: 把部分结晶磷酸钙和磷酸氢钙在无菌条件下按质量 1:1 混和, 加入生物矿化纳米碳管, 混和成粉剂。在无菌条件下把粉剂和去离子水(液固比为 0.45)调和, 在糊状期分成小块, 浸入盛有 250 mL 的生理盐水的无菌玻璃瓶中, 密封置 37 °C 恒温箱中静置浸提 7 d。再小心吸取上层浸提液(浸提液原液)移入另一无菌玻璃瓶中密封, 以进行以下实验。

溶血试验: 将新鲜抗凝人血用生理盐水稀释成2%人血悬液。在不同的试管中分别加入材料生理盐水浸提液(浸提液原液组、50%稀释液组、10%稀释液组)、生理盐水(阴性对照)和双蒸水(阳性对照), 每组3管, 每管2 mL。再在每管分别加入2%新鲜健康人血悬液2 mL, 37 °C水浴1 h, 肉眼观察有无溶血。1 000 r/min离心5 min。取上清液1 mL, 加入0.1%Na₂CO₃溶液4mL, 在752型分光光度计540 nm处测定各样本吸光度并计算溶血率。

体外细胞毒性试验: 贴壁生长的L929细胞(小鼠结缔组织成纤维细胞)中加入RPMI1640培养液(含体积分数为10%小牛血清), 在37 °C, 体积分数为5%CO₂、100%湿度的培养箱中培养, 使其复苏、传代, 再培养至对数生长期进行试验。

将传代培养48 h生长旺盛的L929细胞加入胰酶消化后, 以吸管吹打均匀, 用RPMI1640培养液稀释制成约 $1.5 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$ 浓度的细胞悬液, 接种于无菌96孔培养板上, 每组24孔, 每孔200 μL 。然后分别加入40 μL 浸提液原液、稀释至10%的浸提液、生理盐水(阴性对照组)、

0.64%的苯酚(阳性对照组), 置37 °C、体积分数为5%CO₂恒温箱中培养48 h后, 每孔内加入20 μL MTT溶液, 继续置37 °C、体积分数为5%CO₂恒温箱中培养4 h, 倒去培养孔内的液体, 再在每孔内加入DMSO液体200 μL , 室温下放置30 min, 最后置于酶标分析仪内测定490 nm下各孔的吸光度值。计算细胞相对增殖率。

$$\text{细胞相对增殖率} = \frac{(\text{试验组吸光度值} - \text{空白吸光度值})}{(\text{阴性对照吸光度值} - \text{空白吸光度值})} \times 100\%$$

急性毒性试验: 取NIH品系小白鼠20只, 体质量34.3~45.2 g, 雌雄各半。均衡性别及体质量, 随机均分为实验组和对照组。分别于实验组和对照组小鼠腹腔内以0.05 mL/g剂量注射浸提液或生理盐水, 测量液射后24, 48, 72 h的体质量变化; 14 d内观察2组小鼠一般状况(呼吸状态、进食及运动)和死亡情况。

过敏性试验: 取豚鼠12只, 体质量286~303 g, 雌雄各半, 随机分为实验组、阴性对照组, 每组4只。在豚鼠背部剪毛4 cm×6 cm, 常规消毒后于肩胛骨内侧从头向尾成对地选6个点, 作皮内注射, 每点注射0.1 mL, 分别为完全佛氏佐剂、被试液(0.9%生理盐水、材料浸提液及5%甲醛溶液其中之一)、完全佛氏佐剂与被试液按1:1混合的乳化剂。于第7天同区域剪毛2 cm×4 cm, 消毒后于两点作皮内注射相应被试液0.1 mL, 注射后48 h内观察注射点的红斑、水肿、硬结及焦痂等形成情况。

体外生物力学测试: 取6具甲醛固定的老年尸体胸腰椎标本, 年龄(70±5)岁, 男女各3例, 身高(169±7) cm, 体质量(63.5±6.5) kg, 均摄正侧位片以排除先天性畸形、骨折、肿瘤等病变。每具标本取5个椎体(T₁₂~L₄), 切除两旁的肌肉、软组织, 切除椎间盘及韧带残端, 制造30个单椎体标本。随机分为两组, 每组15个。

建立压缩性骨折模型: 各标本骨折前骨密度、力学测试前的高度、受力面积组间分布差异无显著性意义($P > 0.05$), 具有可比性^[6], 按Kapandji法确定标本的重心点, 按Bai等^[7]方法建立椎体压缩约原高度的1/4, 压缩变形6 mm以内的压缩性骨折模型。

实施椎体成形, 注射骨水泥: 采用Kyphon球束扩张系统, 对椎体进行球束扩张, 扩张压力一般不超过2 068.89 kPa, 恢复了椎体高度后取出球束。按要求调好骨水泥, 椎体内分别注射磷酸钙骨水泥及CNTs处理的磷酸钙骨水泥, 每个椎体注入约4 mL。

填充后的生物力学测试: 骨水泥注入后统一在室温下放置48 h, 保证完全凝固后以1.5 mm/min的加载速度进行前屈方向加载直至再次发生压缩性骨折, 记录极限载荷与位移, 计算抗压强度与刚度。

主要观察指标: 材料对健康人血的溶血率, 材料的

细胞毒性, 急性全身毒性, 皮肤致敏性; 椎体成形后生物力学性能。

设计、实施、评估者: 实验设计为白波, 董伟强, 资料收集为吴显培, 陈艺, 孙辉, 实施为陈艺, 董伟强, 吴显培, 评估为白波, 陈艺, 董伟强, 吴显培, 采用盲法评估。

统计学分析: 应用SPSS 11.0版软件对注射后极限载荷, 抗压强度, 刚度应用配对资料的 t 检验进行统计学分析。

2 结果

2.1 生物相容性试验结果

溶血试验: 新型可注射骨水泥材料对健康人血的溶血率未超过5%, 与阴性对照组结果差异无显著性意义。根据GB/T16886.4-2003可认定新型骨水泥材料无体外溶血作用。

体外细胞毒性试验: 酶标分析仪测定各组的吸光度值计算细胞相对增殖率, 结果见表1。

表1 各组材料对细胞增殖的影响
Table 1 Cell proliferation influenced by various materials in all groups ($\bar{x} \pm s$)

Group	Absorbance value	Relative proliferative rate (%)
Negative control	14.916 $\pm$ 0.312	0
Extracting stock solution	1 003.380 $\pm$ 0.263	109.8 $\pm$ 0.2
10% extracting solution	1 046.290 $\pm$ 0.346	114.3 $\pm$ 0.2
Positive control	85.126 $\pm$ 0.237	9.3 $\pm$ 0.3

参照细胞毒性分级标准, 浸提液原液及稀释液对L929细胞毒性分级均为0级, 0.64%苯酚为IV级。可认定该纳米骨水泥材料无细胞毒性。

急性毒性试验: 实验组各小鼠在注药前、注药后24 h, 注药后48 h及注药后72 h各个时间段的体质量总体上无差异; 而且注药后24 h、注药后48 h及注药后72 h的体质量与注药前相比差异无显著性意义。所有实验小鼠在14 d内无死亡, 活动、进食及排便均正常, 精神状态良好, 无惊厥、瘫痪及呼吸困难等毒性反应。未见中毒症状, 说明新型骨水泥材料无急性全身毒性。

过敏性试验: 实验组织和阴性对照组无皮肤红斑、水肿、溃疡等反应, 致敏点数及致敏率为0。说明新型骨水泥材料的浸提液无皮肤致敏作用。

2.2 生物力学性能检测结果 两组标本的骨水泥最大灌流量分别为(3.8 $\pm$ 0.2) mL和(3.9 $\pm$ 0.1) mL, 各组间数值比较差异无显著性意义($P > 0.05$)。两组椎体成形后极限载荷, 抗压强度, 刚度比较差异有显著性意义($P <$

0.05), 见表2。

表2 两组椎体成形后前屈压缩试验生物力学性能比较
Table 2 The flexional-compression biomechanical properties of two groups applied in percutaneous kyphoplasty ($\bar{x} \pm s$)

Item	Calcium phosphate cement	Calcium phosphate cement treated by carbon nanotube
Extreme load (kN)	3.02 $\pm$ 0.18	3.97 $\pm$ 0.31 ^a
Strength (MPa)	12.47 $\pm$ 1.86	16.74 $\pm$ 0.71 ^a
Stiffness (N/mm)	1 002.96 $\pm$ 2.06	1 256.30 $\pm$ 33.50 ^a

^a $P < 0.05$, vs. calcium phosphate cement group

3 讨论

磷酸钙骨水泥是一类自固化非陶瓷型羟基磷灰石材料, 具有任意塑形, 生物相容性好, 无聚合放热效应, 可与多种有机材料复合等优点, 主要用于填充骨缺损, 椎体成形术等^[8-11]。由于其硬化体属多孔的脆性材料, 在体内不可避免地产生大量缺陷。表现为外力作用下材料会突然断裂。而纳米碳管是由单层或多层石墨片卷曲而成的无缝纳米级管, 管径一般在几纳米到几十纳米之间, 长度可达数微米至数毫米。这种独特的结构赋予了纳米碳管具有相当高的强度和韧性, 还具有优异的电学、磁学、吸波等性能^[12-13], 是一种公认的超强一维增强材料^[14-18]。正是由于纳米碳管优越的表面、体积比^[19-21], 课题组试图用CNTs对磷酸钙骨水泥进行处理, 合成生物复合骨水泥, 显著提高了骨水泥的强度, 与Webster等^[22]研究结果相一致。

尽管对某种材料进行生物学评价时, 所选的供试样品最好是材料成品(终产品)或有代表性部分, 但是由于材料的形状与表面对生物反应有很大的影响, 所以目前对材料的生物学检测普遍采用材料浸提液进行。鉴于此原因, 采用新材料的浸提液, 依据国际标准化组织(ISO)颁布的ISO10993系列, 进行了溶血试验, 细胞毒性试验, 急性毒性试验, 过敏试验, 发现其反应均为阴性, 说明该材料生物相容性好^[23], 与其他学者研究结果相一致^[24-25]。这可能是因为碳在人体环境中是化学惰性, 与人体有良好的生物相容性有关^[26]。

本实验生物力学测试结果显示, 普通的磷酸钙骨水泥可以很好地恢复压缩性骨折标本的强度, 但也显著增强了标本的刚度, 与国内报道结果一致^[27-28]。这势必影响其邻近的未强化椎体, 导致继发骨折的发生, 经生物矿化碳纳米管处理的磷酸钙骨水泥, 其抗压强度明显增强, 但刚度变化不大, 可以说新材料的强度高, 韧性好。这是纳米碳管在骨水泥硬化体材料中能减少因水泥基体收缩而引发

的微裂纹并缩小其尺度,在受荷初期延续与阻止水泥中微裂纹的扩展并最终成为外荷的主要承载者的结果^[29-30]。

结论: 以纳米碳管处理的磷酸钙骨水泥具有良好的生物相容性,其强度和韧性较普通骨水泥有较大的提高,可望发展为一种可应用于临床的新型骨水泥。

4 参考文献

- [1] Chohayeb AA, Chow LC, Tsaknis PJ. Evaluation of calcium phosphate as a root canal sealer-filler material. J Endod. 1987; 13(8): 384-387.
- [2] Kang LJ, Wan QB, Guoji Kouqiang Yixue Zazhi. 2008;35(4):241-243. 康丽娟,万乾炳.碳纳米管-羟磷灰石复合材料研究进展[J].国际口腔医学杂志,2008, 35(4):241-243.
- [3] Wang XP, Ye JD, Wang YJ, et al. Guishuanyan Xuebao. 2007;35(12): 1582-1586. 王秀鹏,叶建东,王迎军,等.钙磷摩尔比对新PCCP+DCPA体系骨水泥性能的影响[J].硅酸盐学报,2007, 35(12):1582-1586.
- [4] Li XQ, Sun KN, Li Z. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2007; 11(35):7057-7060. 李轩琦,孙康宁,李政.增强型磷酸钙骨水泥复合材料添加成分的研究现状[J].中国组织工程研究与临床康复,2007,11(35):7057-7060.
- [5] Zhao P, Zhao DM, Sun KN, et al. Xiandai Shengwu Yixue Jinzhan. 2008;8(10):1852-1854. 赵萍,赵冬梅,孙康宁,等.碳纤维/碳纳米管增强磷酸钙生物复合材料的血液相容性研究[J].现代生物医学进展,2008,8(10):1852-1854.
- [6] Chen Y, Bai B, Sun H, et al. Zhonghua Shengwu Yixue Gongcheng Zazhi. 2007;13(4):216-219. 陈艺,白波,孙辉,等.可注射磷酸钙骨水泥在经皮椎体后凸成形术中的体外生物力学评价[J].中华生物医学工程杂志,2007,13(4):216-219.
- [7] Bai B, Jazrawi LM, Kummer FJ, et al. The use of an injectable, biodegradable calcium phosphate bone substitute for the prophylactic augmentation of osteoporotic vertebrae and the management of vertebral compression fractures. Spine (Phila Pa 1976). 1999;24(15):1521-1526.
- [8] Yu XM, Li WW, Sun K. Shengwu Guke Cailiao yu Linchuang Yanjiu. 2007;4(1):44-47. 余晓鸣,李万万,孙康.磷酸钙骨水泥的新进展[J].生物骨科材料与临床研究,2007, 4(1):44-47.
- [9] Wang RJ, Fan QG, Guo DW, et al. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2009;13(12):2365-2368. 王汝江,樊秋贵,郭殿武,等.骨水泥填充骨质疏松性胸腰椎骨折椎弓根钉置入22例[J].中国组织工程研究与临床康复,2009,13(12):2365-2368.
- [10] Sarda S, Fernández E, Llorens J, et al. Rheological properties of an apatitic bone cement during initial setting. J Mater Sci Mater Med. 2001;12(10-12):905-909.
- [11] Leroux L, Hatim Z, Frèche M, et al. Effects of various adjuvants (lactic acid, glycerol, and chitosan) on the injectability of a calcium phosphate cement. Bone. 1999;25(2 Suppl):31S-34S.
- [12] Gao SL, Li XE, Zhai SM, et al. Huanjing Huaxue. 2008;11(6):831-833. 高素莲,李秀娥,翟淑梅,等.碳纳米管的生物学效应[J].环境化学,2008, 11(6):831-833.
- [13] O'Connell MJ, Bachilo SM, Huffman CB, et al. Band gap fluorescence from individual single-walled carbon nanotubes. Science. 2002;297(5581):593-596.
- [14] Hayachida T, Pan L, Nakayama Y. Mechanical and electrical properties of carbon tubule nanocoils. Physica B: Condensed Matter. 2002;323:352-353.
- [15] Lau KT, Hui D. Effectiveness of using carbon nanotubes as nano-reinforcements for advanced composite structures. Carbon. 2002; 40(12):1597-1617.
- [16] Zhao W, Zhang ZY. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2007;11(9):1758-1760. 赵文,张志愿.碳纳米管在生物医学领域的应用现状及展望[J].中国组织工程研究与临床康复,2007,11(9):1758-1760.
- [17] Liu Y. Changsha: Central South University. 2008. 刘勇.炭/炭复合材料生物相容性研究[D].长沙:中南大学硕士学位论文,2008.
- [18] Li J, Zhang YD, Zhang ZW, et al. Zhongguo Xiandai Yixue Zazhi. 2008;18(2):174-179. 李钧,张阳德,张宗文,等.单壁碳纳米管/羟基磷灰石复合骨材料的制备、微观结构及力学性能分析[J].中国现代医学杂志,2008,18(2):174-179.

- [19] Price RL, Waid MC, Haberstrohm KM, et al. Selective bone cell adhesion on formulations containing carbon nanofibers. Biomaterials. 2003;24(11):1877-1887.
- [20] Elias KL, Price RL, Webster TJ. Enhanced functions of osteoblasts on nanometer diameter carbon fibers. Biomaterials. 2002;23(15): 3279-3287.
- [21] Zanello LP, Zhao B, Hu H, et al. Bone cell proliferation on carbon nanotubes. Nano Lett. 2006;6(3):562-567.
- [22] Webster TJ, Waid MC, McKenzie JL, et al. Nano-biotechnology: carbon nanofibers as improve neural and orthopaedic implants. Nanotechnology. 2004;15(1):48-54.
- [23] Sun L, Zhang YG. Shengwu Yixue Gongchengxue Zazhi. 2008;25(3): 742-746. 孙岚,张英鸽.纳米碳管的生物相容性[J].生物医学工程杂志,2008, 25(3):742-746.
- [24] Elias KL, Price RL, Webster TJ. Enhanced functions of osteoblasts on nanometer diameter carbon fibers. Biomaterials. 2002;23(15): 3279-3287.
- [25] Price RL, Waid MC, Haberstrohm KM, et al. Selective bone cell adhesion on formulations containing carbon nanofibers. Biomaterials. 2003;24(11):1877-1887.
- [26] Ma XH, Zhao JG, Bao JY. Shengwu Guke Cailiao yu Linchuang Yanjiu. 2009;6(3):1-4. 马晓红,赵建国,鲍居宇.炭材料在生物医学领域的应用和进展[J].生物骨科材料与临床研究,2009,6(3):1-4.
- [27] Mao HQ, Yang HL, Chen L, et al. Suzhou Daxue Xuebao: Yixueban. 2007;27(1):17-20. 毛海青,杨惠林,陈亮,等.磷酸钙灌注椎体后凸成形术的生物力学研究[J].苏州大学学报:医学版,2007,27(1):17-20.
- [28] Zhang SD, Jiang XJ, Wu XC, et al. Zhongguo Jizhu Jisui Zazhi. 2007; 17(3):205-209. 张绍东,姜星杰,吴小沉,等.三种骨水泥应用于椎体成形术的生物力学比较[J].中国脊柱脊髓杂志,2007,17(3):205-209.
- [29] Flautre B, Delecourt C, Blary MC, et al. Volume effect on biological properties of a calcium phosphate hydraulic cement: experimental study in sheep. Bone. 1999;25(2 Suppl):35S-39S.
- [30] Gauthier O, Boulter JM, Weiss P, et al. Kinetic study of bone ingrowth and ceramic resorption associated with the implantation of different injectable calcium-phosphate bone substitutes. J Biomed Mater Res. 1999;47(1):28-35.

来自本文课题的更多信息——

基金资助: 广东省卫生厅基金资助项目(A 2007249)。

利益冲突: 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

课题的意义: 对新型材料进行生物相容性和生物力学的研究,其结果能为材料实际应用于临床提供理论依据,具有重要的意义。

课题评估的“金标准”: 评估生物相容性的“金标准”是国际标准化组织(ISO)颁布的 ISO10993 系列,已在课题中应用。

设计或课题的偏倚与不足: 新型材料在实验中的结果,可能与其应用于临床的结果不一致;故本研究仅能为新型材料应用于临床提供理论依据,而新型材料的良好性能仍需在临床中进一步验证。

提供临床借鉴的价值: 以纳米碳管处理的磷酸钙骨水泥具有良好的生物相容性,其强度和韧性较普通骨水泥有较大的提高,可望发展为一种应用于骨质疏松性骨折和多种常见骨缺损的新型骨水泥。