

电磁治疗与骨重建研究综述与展望

宁焕生¹, 李江², 王宝发¹, 王炳辉³

(1. 北京航空航天大学电子与信息工程学院, 北京 100083; 2. 北京航空航天大学生物工程系, 北京 100083; 3. 中科院研究生院, 北京 100049)

摘要: 本文首先综述了国内外在电磁刺激促进骨形成和重建方面的最新研究进展, 并从宏观效果和微观机理研究两方面提出问题, 然后从三方面指出研究方向和途径: 骨电磁参数理论模型建立、宏观和微观实验研究方向。针对骨作为各向异性媒质, 考虑其生物复杂性的同时, 论述了理论建模过程中存在的问题和解决办法, 从宏观试验出发提出了电磁刺激对骨重建的研究内容, 并对细胞分子和生物因子的微观实验研究提出了方向。

关键词: 电磁; 骨; 骨重建

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 09-1651-05

A Survey of Studying on EM Therapy in Bone-Rebuding

NING Huan-sheng¹, LI Jiang², WANG Bao-fa¹, WANG Bing-hui³

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Department of Biological Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China;

3. School of Graduate, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: The new research and application of using electromagnetic therapy in bone-rebuilding was surveyed in this paper. Meanwhile, some possible research methods are suggested in three aspects. Firstly, bone is anisotropic EM media. Considering its biological complexity, the difficulty and solving method are shown. Secondly, research topics are proposed in macro experimentation. Finally, some methods and research fields are proposed based on the micro cell and molecule experimentation.

Key words: electromagnetic; bone; bone-rebuilding

1 引言

骨损伤和骨重建是当前航天生物医学工程、运动医学和中老年保健等领域的重要课题, 传统医学方法临床效果有一定的局限性。自从骨的力电效应^[1,2]发现以来, 有关电磁刺激用于骨的重建研究受到临床和研究工作者的重视。很多临床研究及应用表明: 电磁场的作用是骨重建的有效方法之一。但电磁场对骨的作用机理尚不完善, 尤其是缺乏有效的理论模型。因此, 它已成为电磁、生物和航天领域的交叉学科面临的重大研究方向, 具有重要理论和临床治疗意义。

到目前为止, 国际上就电磁用于骨重建研究大致可以分为两类^[3]: 即宏观重建模型和微观重建模型。

2 宏观效果研究

基于宏观效果的骨应力与重建模型分为两类: 即骨的外部重建(或表面重建)模型和骨的内部重建模型。骨的外部重建, 是指骨的外部形状的变化, 包括骨的内外表面和骨的两端的生长与吸收; 而骨的内部重建则是指骨质内部的多孔性、无机物含量、X线不透明度与物质密度以及骨单位腔的直接变

化等。

基于宏观效果的骨电磁重建方法研究最早起源于1957年 Fukada 和 Yasuda^[1]对骨的力电性质(SGP)的发现, 随后研究发现(Bassett^[4])应力促进骨重建的原因可能是应力在骨内产生的电位, 正是这种电位引起细胞反应导致生成。进而认为既然应力产生的电位促进骨重建, 那么不加应力而是外加电信号也将引起细胞反应达到促进骨重建的目的。SGP的研究是沿着“干骨-湿骨-活体骨”这一路线进行的。

在国际上, 目前有关骨的电磁参数模型大多是依据间接试验结果和已知原理推测出来的, 有些国家(如前苏联)已用于临床。在进行理论研究的同时, 很多生物试验也证明了电磁场对骨生长、重建及代谢等能够产生影响。动物试验发现: 在磁场作用下, 实验组的骨小梁数目及厚度均增加, 股骨的最大抗拉强度和椎体的最大抗压强度均达到正常, 人体脊柱、股骨等骨骼表面和内部将产生随时间变化的感应电流, 通过电磁生物效应, 影响骨细胞代谢, 提高骨密度, 改善骨质量, 达到预防和治疗骨质疏松及骨折的目的。骨质疏松病人常常有腰背疼痛、髌骨、双下肢的疼痛, 机体在磁场作用下可降低神经末梢反应性, 对中枢神经有抑制作用, 而产生镇痛效果。

收稿日期: 2004-10-18; 修回日期: 2005-05-18

磁场促进骨生长,成骨细胞反应与磁场强度频率与治疗时间有密切关系,对成骨效应作用明显的能量集中在 75Hz 以下,在 15~35Hz 范围出现最有效的成骨,达到抑制骨衰退和逆转骨质疏松症的效果。

国内中科院力学所、中医研究院骨伤科研究所、中科院生物物理所、天津大学等单位在骨的力电效应方面也开展了很多研究^[5],同时国内一些学者也做了一些关于电流刺激、脉冲波作用的研究和试验工作^[6,7]。将电磁刺激和传统针灸结合在临床应用中也取得了一定的疗效。

总的来说,由于生物体的生物多样性和活体骨的复杂性,且活体骨随人的性别、年龄、个体不同而差异很大。国内外有关活体骨的电磁参数和电磁场作用于骨重建的理论仍不明确,尤其是计算机仿真和数值计算方面,还没有很有效的理论模型。

3 微观机理研究

在进行宏观机制的骨电磁治疗研究的同时,人们总是试图通过微观机理进行解释,通过对骨的压电效应(Piezoelectricity)和动电现象^[8,9](Electrokinetic Phenomena)的进一步研究表明:在应力、电刺激或某些激素(如 PTH 甲状腺激素)作用下,骨细胞可产生骨溶解作用而具有破骨细胞的功能,破骨细胞受到活化并向成骨细胞转化^[10~13]。Fukada 在测量骨和胶原的压电矩阵时证实骨产生的电场将诱导骨重建。Bessett 等将一金属板埋入活体骨附近,板上的负电荷诱导新骨材料沉淀于电极上,近正极处则未发现正骨吸收。Becker 与 Murray 报道了电场能激活蛙的成骨细胞细胞器蛋白质合成。以后的研究表明:电磁环境主要通过直接和间接两种途径影响骨重建。直接方式有如下五种:影响骨环境的 pH 值,促进无定形磷酸钙开始沉淀;影响 Ca⁺⁺ 离子浓度,调节控制膜的通透性和细胞间的交换和分配;影响细胞膜和线粒体膜,促进有丝分裂和钙盐沉淀;通过影响细胞的营养和酶来促进细胞分化;并在 PTH 或降钙素(CT)等激素的协同作用下转化为成骨细胞。

Friedenberg 和 Brighton 报道了电流可降低局部组织的氧张力的事实,氧张力降低能刺激静止的多功能细胞分化为成骨细胞和成软骨细胞,并有利于钙盐从软骨细胞的线粒体内释放出来而钙化。电磁环境间接影响骨重建主要有三个方面:对胶原的影响,胶原纤维可在电场中电泳,并且胶原纤维在电场中有定向作用^[13]。对粘多糖的效应,粘多糖在电场中也携带电荷并在电场中移动,可影响细胞代谢。对矿物化的作用,可影响钙磷灰石的沉淀,影响有效质子受体的生长率和胶原的矿物化。

对于电离辐射,Chae 等^[14]认为电离辐射刺激成骨细胞分化主要是由于辐射期间活性氧簇的产生,自由基的释放被认为是放射治疗最重要的机制。此外,辐射诱导 JNK/SAPK(c-junNH₂ 末端激酶/应激活化蛋白激酶)和 AP-1(转录因子)的激活是其发生的分子生物学基础。JNK 和 AP-1 的激活与成骨细胞受辐射释放自由基相关联。Dudziak 等^[15]研究了不同剂量的电离辐射对 TGF- β (转化生长因子)、VEGF(血管内皮生长因子)及 ALP(碱性磷酸酶)表达的影响,结果表明,随着辐射

剂量的增加,成骨细胞的增殖减弱,TGF- β 和 VEGF 的分泌也减少,但是辐射却促进了成骨细胞的分化,主要表现在碱性磷酸酶的表达明显增加。夏玉莲等^[16]发现:在体外,电离辐射剂量小于 400mGy 时,对成骨细胞的生长和分化没有明显的影响;而大于 400mGy 时则依细胞种属的不同,对成骨细胞的增殖和分化产生不同的影响。

近年来,电磁影响骨重建微观研究比较活跃,已从骨微观结构和微观环境逐渐深入到生长因子和细胞水平。自从 1989 年 Fitzsimmons^[17,18]发现体外培养的鸡胚颅盖骨细胞在电磁场作用下增殖有赖于培养基中胰岛素样生长因子 II(IGF-II)的丝裂原活性,这一发现引起不少学者注意,有关力-电环境诱导骨局部因子产生的报道也日渐增多^[19],电磁场对部分重要的生长因子的影响可归纳如下:

电磁与胰岛素样生长因子 II(IGF-II)

IGF-II 对骨细胞具有促增殖作用,还影响原胶原 mRNA 的合成。Fitzsimmons 发现电磁场在刺激成骨细胞增殖的同时不仅可诱导成骨细胞释放 IGF-II 到培养基,而且可增加细胞增殖。将鸡胚颅盖骨组织暴露于低幅电容耦合电磁场中(培养基中电压梯度为 10⁻⁷ v/cm),发现骨细胞增殖不仅有频率依赖性,还依赖于培养基中丝裂原活性。

电磁与骨形成蛋白(BMP)

BMP 能诱导未分化的间充质细胞经过趋化、分裂、分化三个环节不可逆分化为软骨细胞和成骨细胞,诱导新骨形成。Nagai^[20]利用脉冲电磁场研究其对发育中鸡胚颅盖骨 BMP-mRNA 表达的影响。临床上证实脉冲电磁场有明显刺激骨愈合作用。表明脉冲电磁场可以刺激鸡胚颅盖骨表达 BMP-2、BMP-4,且早期鸡胚颅盖骨更为敏感。另外,他们指出,脉冲电磁场的靶细胞可能是颅盖骨中的骨生成细胞。

电磁与其它局部因子

Cossarizza^[21]对脉冲电磁场作用于免疫系统细胞产生多种细胞因子作了多年研究,发现这些因子不光作用于免疫系统细胞,还广泛作用于神经和内分泌细胞、软骨细胞、成纤维细胞和骨细胞等。其中脉冲电磁场作用于骨周围血单核细胞(PBMC),产生 IL-1、IL-6,这两种细胞因子有促进骨质吸收、胶原合成,参与骨改建等作用。

此外,Heermeierk^[22]等发现 20Hz 正弦波电磁场作用于健康人和骨化性肌炎病的成骨细胞时,I 型胶原蛋白的 mRNA 表达分别增加了 3.7 倍和 5.4 倍,骨化性肌炎病的成骨细胞生成了成骨细胞特征的细胞外基质。Lohmann^[23]通过实验表明,脉冲电磁场可增强成骨细胞的增殖能力及碱性磷酸酶的表达,这与骨钙素及胶原的增加相一致。成骨细胞对脉冲电磁信号的刺激相当敏感,这种刺激是通过局部细胞因子的产生而达到。

近二十多年来,为了更好地利用力电刺激这一有效治疗手段,学者们一直在探讨力电环境下成骨的机制。力-电刺激诱导骨局部因子产生已相继被体外实验所证实,被认为是力-电刺激促进骨愈合的机制之一。但具体的微观机理还不太清楚,有待于进一步研究。

4 骨电磁参数模型研究

4.1 理论模型建立

骨作为各向异性媒质,其电磁参数描述非常复杂,从干骨-湿骨-活体骨逐步深入建立电磁模型,尤其是从湿骨过渡到活体骨非常复杂。

根据大量前期探索和测量表明:干骨作为各向异性媒质还没有发现其具有双轴各向异性媒质的显著特征,因此首先可以采用单轴各向异性媒质的方法对其建立参数和理论计算模型,并在此基础上与测量结合进一步进行修正。

干骨中的电磁参数测量主要是介电系数和导磁系数,其它电磁参数都能直接和间接得到。其中导磁系数 μ 近似等于 $\mu_0 = 1$,因此主要问题是测量介电系数。

电磁波在干骨中的传播问题可以看成是在介质中的传播问题,骨中的结构可以看成非均匀的蜂窝结构,骨膜部分作为透波结构的介质表面处理。干骨的介电系数为一张量复介电系数。国际上有很多试验模型得出了一些经验值,最典型的是通过压电效应测大腿骨的介电系数,不过不同模型测出的数据差异较大,这恰恰也体现了生物体本身的复杂性和多样性,也许需要一个统计型的数学模型来描述某一类的骨比较合适。

对于湿骨,骨的湿度和离子分布较干骨更加复杂,其中的离子在电磁场的作用下将产生运流电流,这一电流将影响湿骨等效介电常数的大小。当频率接近湿骨的某一特定的频率时,离子和周围的碰撞次数增大,湿骨对电磁波的损耗也明显加大。电磁激励时的热效应也更加明显。当然,这种热效应未必有利于骨重建,它和骨重建效果之间的关系有待进一步研究。

干骨和湿骨的电磁参数模型研究主要是为测量活体骨的电磁参数模型打下基础,因为真正的骨重建是建立在活体骨的基础上的。因此,活体骨的电磁参数模型、骨及周围的机体在电磁波照射下的电磁模型建立对研究骨重建是至关重要的。活体骨的电磁参数与生理过程密切相关,不同年龄、不同人群的骨电磁参数差异很大。同时重建活体骨电磁参数的难点在于其电磁场逆问题的病态特性的研究。骨膜是产生成骨细胞、破骨细胞、骨刺生长及骨重建的关键组织,从电磁场及电磁辐射角度来分析,可将骨膜看成是一电阻抗结构。而且活体骨中有血液在流动,血液中有大量顺磁性物质(如铁),这时的电磁模型不再象干骨和湿骨那样简单,导磁系数不再近似为 $\mu_0 = 1$ 。由于骨周围的机体存在,皮肤、肌肉和血液形成一层非均匀各向异性结构,对电磁计算模型的建立增加了很大的难度。目前,有关电磁激励活体骨重建的课题各国都在努力,是一个重要的交叉研究课题。

对于理论计算而言,很多模型都需要优化,如果建立了比较理想的理论电磁参数模型,通过生物实体试验来优化理论模型比较实际,但一般这种方法周期较长,而且随机影响因素较多。很多时候需要建立电磁激励下骨重建的计算机仿真模型,这里的一个重要的因素就是如何模拟生物体随时间变化的状态,包括血液循环、新陈代谢、甚至淤血的变化等都随时

间而变化,此时的难度在于模拟生物体复杂的生理活动。

4.2 宏观试验研究

在骨重建过程中,脉冲波间隔频率可重点考虑在生物体日常活动和锻炼时活动间隔时间,脉冲宽度选取将考虑骨在活动过程中作用时间内的作用效果,波形选择尽量达到其电流和热疗效作用效果能够和活动时的效果相比拟。比如:人腿骨在慢跑时作用频率大约 1~2Hz,每次骨作用时间大约 0.2~0.5 秒,一个动作过程中骨由于压电效应将产生一个随时间变化的电流波形,这样就能模拟受伤不便运动的骨能够在不运动情况下能够达到运动效果;同时对于活体骨脉冲作用频率也会考虑 10~300Hz,这是活骨周围肌肉系统的敏感频率区域;电磁波照射的时间考虑在 30 分钟~8 个小时之间,以参照人在日常生活中连续活动的时间作参考。

连续波对骨重建的影响比较复杂,不同的频率对同一个生物体作用效果差异很大,有促进也有抑制作用,主要体现在宏观现象和微观机理方面。即使是对某一块活体骨而言,细胞外基质分泌和合成、血红素形成、自由基活动、生物膜通透性、生物大分子活性等方面最有利的电磁激励频率都有所不同。首先根据数学模型进行理论计算和计算机仿真,然后结合生物临床的经验,对电磁波的频率、极化、入射方向、强度等进行优化选择,以便从总体上有利于骨重建。用 Northern Blotting 法检测活骨组织和成骨细胞的 I、III 型胶原蛋白的 mRNA 表达,以观察电磁场作用下的骨重建效果。

邻近原胶原蛋白的电场能使纤维自行排列而垂直于力线^[13,24,25]。那么反过来,如果将电场激励设计成尽量使力线垂直于纤维的话,是否将大大有助于骨重建,甚至有利于骨骼周围的肌肉恢复,也是一个很有意义的尝试。

4.3 微观试验研究

4.3.1 研究利于骨重建和体外骨细胞的培养的最优化电磁参数、实验过程和理论模型 通过体外细胞的培养,研究这些细胞对特定电磁场的反应,可以从微观细胞分子层次上帮助理解特定电磁场参数对骨组织的作用,并进而制定或设计有助于骨损伤治疗的电磁参数标准。电磁场参数对骨损伤和骨重建的影响,最终是看不同的电磁场参数(如脉冲宽度、频率、极化、作用时间、入射方向等)如何影响成骨细胞、破骨细胞和骨细胞来确定的,尤其包括胶原蛋白在内的其他细胞外基质的合成分泌,其中作为结构蛋白的 I 型胶原蛋白和愈合组织主要成分的 III 型胶原蛋白可能应重点研究,细胞分泌的 I 型胶原蛋白单体的组装和胶原纤维的走向同其所受的应力场有关,是否与电磁场有关也值得考虑。考虑时间变化因素的骨损伤与重建电磁模型。

4.3.2 进一步的生物电磁试验 在特定电磁参数和作用时间下,电磁场对成骨细胞、破骨细胞、骨细胞的作用可在如下方面做进一步的实验探讨:对细胞的排列、增殖、活力、凋亡、迁移和粘附等活动的影响。对包括非晶质磷酸钙和结晶的羟磷灰石在内的骨无机盐的分泌、整合素(Integrin)的合成分泌、离子通道的改变、细胞感知电磁场并作出反应的信号转导途径等方面的影响。对细胞迁移和粘附起重要作用的 2、5、6、 ν 、1 整合素亚单位、纤连蛋白(Fibronectin)、层粘

连蛋白(Laminin)的表达、翻译和合成过程的影响。此外,电磁场是否能使骨髓间充质干细胞 MSC 分化为成骨细胞、破骨细胞和骨细胞也是有意义的研究方向。

5 结论

骨电磁重建研究是国际上电磁学和生物学结合起来研究的一个交叉领域前沿课题,有助于把电磁学原理和计算方法深入到生物医学工程领域进行研究,从而为用电磁场治疗骨损伤提供理论依据和临床应用基础,并可以为用组织工程方法来制造人造骨提供一个有力的工具,从而具有重要的理论意义和临床应用价值。

参考文献:

- [1] Fukada E, Yasuda I. On the piezoelectric effect of bone [J]. *J Phys Soc*, 1957, Japan 12:1158 - 1162.
- [2] 候振德,高瑞亭. 骨的机电性质[J]. *力学进展*. 1995, 25(1) :85 - 101. Hou Zhen-de, Gao Rui-ting. Electromechanical properties of bone[J]. *Advances in mechanics*. 1995, 25(1) :85 - 101. (Chinese Source)
- [3] 王西十,等. 活骨组织应力与重建适应模型的研究现状与展望[J]. *生物医学工程学杂志*. 2001, 18(3) :479 - 483. Wang Xi-shi, et al. Research Current Status and Prospect of the Stress and Remodeling Adaptation Models in Living Bone Tissue[J]. *J Biomed Eng*, 2001, 18(3) :479 - 483. (Chinese Source)
- [4] Baszett R D, Backer R O. Generation of electric potentials by bone in response to mechanical stress[J]. *Science*, 1962, 137(3535) :1063 - 1069.
- [5] 钱民全,等. 骨生长与骨折愈合的生物力学研究[J]. *中国基础科学*, 2002, (1) :24 - 28. Qian Min-quan, et al. Biomechanical study of bone growth and bone fracture healing[J]. *China Basic Science*, 2002, (1) :24 - 28. (Chinese Source)
- [6] 龙英,等. 电磁刺激对成骨样细胞 UMR-106 DNA 合成的作用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2000, 40(3) :15 - 19. Long Ying, et al. Effects of electromagnetic fields on DNA synthesis in an osteoblast-like cell line (UMR-106) [J]. *J Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2000, 40(3) :15 - 19. (Chinese Source)
- [7] 汤青,赵南明. 低频电磁场对成骨细胞增殖及细胞周期的影响[J]. *科学通报*, 1999, 44(20) :2191 - 2194. Tang Qing, Zhao Nan-ming. Effects of LFEMFS on the growth and cell life circle of Osteoblast [J]. *Chinese science bulletin*, 1999, 44(20) :2191 - 2194. (Chinese Source)
- [8] Anderson J, Eriksson C. Electrical properties of wet collagen[J]. *Nature*, 1968, 218(137) :166 - 168.
- [9] Wiksson C. Electrical properties of bone[A]. *Biochemistry and physiology of bone*[M]. New York:Academic Press, 1976. 329 - 384.
- [10] Wolff J, Das Gesetz der Transformation [M]. *der Knochen*, Hirschwald, Berlin, 1892. 110 - 157.
- [11] Wolff J. The law of bone remodeling[M]. Springer, Berlin, 1896. 57 - 123.
- [12] Frost HM. The laws of bone structure[M]. Charles C Thomas, Springfield, III, 1964. 34.
- [13] 王祖昌,钱英民. 应力下的骨电活动与骨的重建[J]. *力学进展*, 1984, (3) :299 - 310, 2191 - 2194. Wang Zu-chang, Qian Ying-min. Current activities and remodeling of bone under stress [J]. *Advances in mechanics*, 1984. (3) :299-310, 2191 - 2194. (Chinese Source)
- [14] Chae HJ, Chae SW, Kang JS, et al. Effect of ionizing radiation on the differentiation of ROS 17/2. 8 osteoblasts through free radicals [J]. *J Radiat Res(Tokyo)*, 1999, 40(4) :323 - 335.
- [15] Dudziak ME, Saadeh PB, Mehrara BJ, et al. The Effects of ionizing radiation on osteoblast-like cells in vitro [J]. *Plast Reconstr Surg*, 2000, 106(5) :1049 - 1061.
- [16] 夏玉莲,等. 几种物理因素对体外培养成骨细胞的影响[J]. *国外医学 放射医学核医学分册*, 2002, 26(6) :285 - 287. Xia Yu-lian, et al. The effects of physical factors on osteoblast in vitro [J]. *Foreign Medical Sciences-Section of Radiation Medicine and Nuclear Medicine*. 2002, 26(6) :285 - 287. (Chinese Source)
- [17] Fitzsimmons RJ, Farley J R, Adey WR, et al. Frequency dependence of increased cell proliferation, in vitro, in exposures to a low-amplitude, low-frequency electric field: evidence for dependence on increased mitogen activity released into culture medium [J]. *J Cell Physiol*, 1989, 139(3) :586 - 591.
- [18] Fitzsimmons RJ, Strong DD, Mhan S, et al. Low-amplitude, low-frequency electric field-stimulated bone cell proliferation may in part be mediated by increased IGF-II release [J]. *J Cell Physiol*, 1992, 150(1) :84 - 89.
- [19] 郑磊,等. 力-电环境促进骨形成的机制-骨局部因子[J]. *生物医学工程学杂志*. 2000, 17(2) :218 - 222. Zheng Lei, et al. The Mechanism of bone formation promoted by mechano-electrical environments ——current studies on local bone factors [J]. *J Biomed Eng*. 2000, 17(2) :218 - 222. (Chinese Source)
- [20] Nagai M, Ots M. Pulsating electromagnetic field stimulates mRNA expression of bone morphogenetic protein 2 and -4 [J]. *J Dent Res*, 1994, 73(10) :1601 - 1605.
- [21] Cossarizza A, et al. Exposure to low frequency pulsed electromagnetic field increases interleukin 1 and interleukin 6 production by human peripheral blood mononuclear cells [J]. *Exp Cell Res*, 1993, 204(1) :385 - 387.
- [22] Heermeier K, et al. Effects of extremely low frequency electromagnetic field (EMF) on collagen type I mRNA expression and extracellular matrix synthesis of human osteoblastic cells [J]. *Bioelectromagnetics*, 1998, 19(4) :222 - 231.
- [23] Lohmann CH, Schwartz Z, Liu Y, et al. Pulsed electromagnetic field stimulation of MG63 osteoblast-like cells affects differentiation and local factor production [J]. *J orthop Res*, 2000, 18(4) :637 - 646.
- [24] Becker R O, Murray D G. The electrical control system regulating fracture healing in amphibians [J]. *Clin Orthop Rel Res*. 1970, 73:169 - 198.
- [25] 郑秀媛,等. 现代运动生物力学(第一版) [J]. 北京:国防工业出版社, 2002. 348 - 373. Zheng Xi-ruyuan, et al. Modern sports biomechanics [J]. Beijing: National Defense Industry Press. 2002. 348 - 373. (Chinese Source)
- [26] 张维蛟,等. 脉冲电磁场对家兔骨软骨骨折愈合的影响[J]. *白求恩医科大学学报*, 2001, 27(2) :171 - 174. Zhang Wei-jiao, et al. Effect of pulse electromagnetic fields on the repair of osteochondral fracture in rabbits [J]. *Journal of Norman Bethune university of medical*, 2001, 27(2) :171 - 174. (Chinese Source)
- [27] Podkovkin V G, et al. Effects of perturbed geomagnetic field on connective tissue growth factor mRNA expression in rat osteoblasts [J]. *J Cell Physiol*, 2002, 191(2) :211 - 218.

- tive tissue metabolism and some systems of homeostasis after hydroxyapatite implantation. *Radiats Biol Radioecol*[J]. 2003,43(5):594 - 596.
- [28] Cohly H H, et al. Effects of static electromagnetic fields on characteristics of MG63 osteoblasts grown in culture [J]. *Biomed Sci Instrum*, 2003,39:454 - 459.
- [29] Hirose H, et al. Orientation of human glioblastoma cells embedded in type I collagen, caused by exposure to a 10T static magnetic field[J]. *Neurosci Lett*, 2003,338(1):88 - 90.
- [30] Ciombor D M, et al. Low frequency EMF regulates chondrocyte differentiation and expression of matrix proteins[J]. *J Orthop Res*. 2002,20(1):40 - 50.
- [31] Guerkov H H, et al. Pulsed electromagnetic fields increase growth factor release by nonunion cells. *Clin Orthop* [J]. 2001,Mar (384):265 - 279.
- [32] Fredericks D C, et al. Effects of pulsed electromagnetic field stimulation on distraction osteogenesis in the rabbit tibial leg lengthening model [J]. *J Pediatr Orthop*. 2003,23(4):478 - 83.
- [33] Linovitz R J, et al. Combined magnetic fields accelerate and increase spine fusion: a double-blind, randomized, placebo controlled study. *Spine*, 2002,27(13):1383 - 1389.
- [34] Vercaigne S, et al. A mechanical evaluation of TiO₂ gritblasted and Ca-P magnetron sputter coated implants placed into the trabecular bone of

the goat: Part 1[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2000,11(4):305-313.

作者简介:



宁焕生 男,1975 年生于安徽怀宁,北京航空航天大学电子信息工程学院博士后,1996 年毕业于安徽大学,获电子工程专业学士学位;1996-2001 年,北京航空航天大学硕博连读,获通信与信息系统博士学位;2002-2003 年,航天科工集团航天金卡公司副总师;主要研究领域为:PMP、RFID、电磁散射、智能交通等。

E-mail:ninghuansheng@vip.sina.com.

李江 男,1970 年生于新疆库尔勒市,北京航空航天大学生物工程系博士生,1991 年毕业于天津科技大学获学士学位,2002-至今北京航空航天大学生物力学专业博士研究生,博士研究方向:细胞力学、生物流变学。E-mail:lijiang00@sohu.com.

王宝发 1938 年 8 月出生于天津,教授,博士生导师,1961 年获北京航空学院学士学位,1983 年至 1985 年为 Illinois 大学电磁实验中心的访问学者,现为北京航空航天大学教授,主要从事电磁散射和传播、电磁兼容、雷达目标识别等方面的研究工作。

王炳辉 男,1972 年生于安徽阜阳,中科院研究生院信息与通信系统专业硕士研究生,主要研究方向为信号处理、医学工程。

www.cnki.net