

文章编号: 1004-7220(2021)02-0251-06

动静组合载荷加速正畸牙移动的动力学分析

李淑娴, 马宗民, 高文波, 聂秀吉

(大连大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘要:目的 分析机械振动加速正畸牙移动中颌骨及牙周组织的应力分布,探讨动静组合载荷加速正畸牙移动的机理。方法 采用 Mimics、SolidWorks、Geomagic 和 ANSYS Workbench 软件建立包括牙齿、牙周膜、牙槽骨松质骨、牙槽骨皮质骨的有限元模型,施加侧向静态正畸力、低值高频机械振动载荷,进行动力学分析。结果 牙槽骨及牙周组织的近远向正应力(Y 向应力)分布可清晰区分张力、压力区,呈现周期性变化,并且其频率与加载的低值高频机械振动载荷一致;牙槽骨及牙周组织 von Mises 应力亦呈现周期性变化,但无法区分张力、压力区。结论 在口腔正畸领域,近远向正应力为合适的力学激励表征量;侧向静态正畸力与低值高频机械振动载荷组合的动静组合载荷是一个可行的加速正畸牙移动方法。研究结果可为低值高频机械振动加速正畸移动提供指导。

关键词:机械振动;正畸力;牙移动;动力学分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.02.013

Dynamic Analysis on Static-Vibration Coupled Loading in Accelerating Orthodontic Tooth Movement

LI Shuxian, MA Zongmin, GAO Wenbo, NIE Xiuji

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

Abstract: Objective To analyze stress distributions on mandible bone and periodontal ligaments during acceleration of orthodontic tooth movement by mechanical vibration, and investigate the mechanism of static-vibration coupled loading to accelerate orthodontic tooth movement. **Methods** The finite element model including tooth, periodontal ligament, cancellous bone and cortical bone was established by Mimics, SolidWorks, Geomagic and ANSYS Workbench software. Conventional static orthodontic force and low-magnitude high-frequency mechanical vibration loads were applied to the finite element model for dynamic analysis. **Results** The compression and tension zones of alveolar bone and periodontal tissues were identified based on Y -normal stress distribution of alveolar bone and periodontal tissues, which was periodic with the same frequency as the applied low-magnitude high-frequency vibration. The von Mises stress of alveolar bone and periodontal tissues also showed periodic changes, but the compression and tension zones of alveolar bone and periodontal tissues could not be identified based on von Mises stress distribution of alveolar bone and periodontal tissues. **Conclusions** In the field of orthodontics, Y -normal stress is a reasonable mechanical stimulus, and static-vibration coupled loading is an effective method for accelerating orthodontic treatment. The research findings can provide guidance for low-magnitude high-frequency mechanical vibration to accelerate orthodontic tooth movement.

Key words: static-vibration coupled loading; orthodontic force; tooth movement; dynamic analysis

收稿日期:2020-04-21; 修回日期:2020-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(11602047,11572066),大连大学研究生教育教学改革基金

通信作者:马宗民,副教授,E-mail:mzm9909@163.com

牙列错颌畸形破坏患者脸部容貌,影响患者颌面部咀嚼与发音等生理功能,影响患者的生活质量和社会交往,给患者身心健康带来不利影响^[1-2]。传统正畸治疗需要1~3年时间^[3]。长期的正畸治疗不仅费用高,还会出现牙根吸收、牙齿脱矿等影响患者口腔健康的问题^[4]。加速正畸牙移动能够缩短正畸治疗周期,是正畸治疗领域重点关注的问题。近年来,机械振动加速牙正畸成为研究热点。

机械振动加速牙正畸疗效目前存在争议,其机理尚未完全清楚^[5-6]。正畸牙移动是牙槽骨及牙周组织对正畸力的力学适应,是正畸牙在新的位置上力学适应改建的结果^[7]。骨重建是牙槽骨改建的生理机制,是一个力生物学过程。从力学角度看,正畸牙牙槽骨通过骨量增减调节力学环境以适应新的正畸牙位置,力学刺激决定骨量的增减调整方向。从力生物学角度看,牙槽骨骨组织感知微观力学信号,转导为生物化学信号,然后传导至效应细胞,通过骨重建机制完成骨量的增减调整。因此,加速牙正畸就是要加速骨量的增减调整,力学信号感知传导是加速正畸牙移动的关键。

骨骼细胞对动载荷的力学敏感性高于静态载荷。研究认为,动载荷较静载荷更加利于骨生长;刺激骨骼形成的低强度力学信号取决于力学信号的频率,而非应变幅值^[8-9]。上述结果表明,骨骼细胞对力学信号感知主要在于力学信号的频率。周期动载荷会引起材料的微损伤,骨内微损伤也是刺激骨重建的重要因素^[10]。周期动载荷会引起材料的疲劳微损伤,平均应力是重要影响因素。平均应力大于零,对疲劳不利;反之,对疲劳有利^[11-12]。本文从力学角度出发,分析侧向静态正畸力与低值高频振动组合加载情况下的微观力学信号,探讨动静组合载荷加速正畸牙移动的机理,为振动载荷加速正畸牙移动提供指导。

1 材料与方法

1.1 三维模型建立

对1名17岁男性正畸患者颌骨进行逐层CT扫描,获取DICOM图像文件;在Mimics 17.0软件中完成颌骨三维重建,通过Geomagic 12软件优化平滑处理,导入SolidWorks 2016软件进一步处理,在ANSYS Workbench 15.0软件中生成网格化的颌

骨三维模型。本文截取部分颌骨骨段进行正畸计算^[13-15]。有限元网格划分采用4节点四面体单元,其中皮质骨单元数13 076个,节点数24 124个;松质骨单元数30 909个,节点数50 060个;牙周膜单元数15 886个,节点数27 612个;牙齿单元数10 795个,节点数18 168个。正畸模型见图1,其中图1(c)所示为正畸牙周组织压力与张力区分布。加载侧向正畸力后,牙齿发生倾斜移动,牙齿冠部和牙根朝相反方向倾斜。A、D区牙周组织承载牵张力,根据力学理论规定为正,标识“+”;B、C区牙周组织承载压力,根据力学理论规定为负,标识“-”。

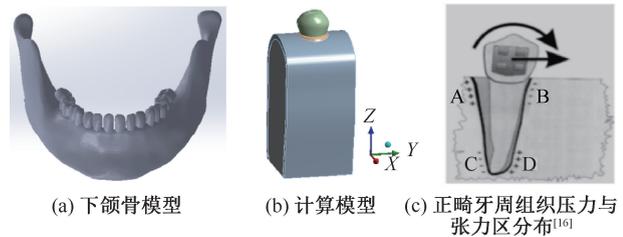


图1 正畸模型

Fig.1 Orthodontic model (a) Model of mandible, (b) Computational model, (c) Compression and tension zones in the periodontal ligament and the alveolar bone^[16]

1.2 材料参数和加载条件

模型中牙齿、皮质骨、松质骨、牙周膜均简化为连续均质、各向同性、线弹性材料模型,弹性模量分别为18 000、13 000、1 000、0.69 MPa,泊松比分别为0.3、0.3、0.3和0.45^[14-15]。模型中不同部位组织采用绑定接触。颌骨底部固定约束;正畸牙加载5 N静态侧向正畸力^[13,17];咬合面加载频率50 Hz、振动幅度0.2 N低值高频振动载荷^[18]。

1.3 模型验证

为验证正畸模型的正确性,与文献[13]中牙齿颌骨模型实验数据进行对比。对本文牙齿颌骨正畸模型在牙齿咬合面施加100 N轴向力模拟咀嚼载荷,观测不同区域的应变能密度,所得结果与文献[13]的结果相近,模型得到验证。

1.4 观测指标

主要观测指标为Y向应力和von Mises应力。牙齿在加载侧向正畸力后,牙齿两侧的牙槽骨及牙周组织分为压力、张力区,通过压力区减少骨量、张

力区增加骨量进行牙槽骨及牙周组织的改建,并且应力变化主要为近远向正应力,即Y向应力。

2 结果

为方便比较牙齿两侧牙槽骨及牙周组织压力和张力区的应力分布结果,应力云图采用近远向牙齿轴向剖面视图。图2所示为侧向正畸力+机械振动组合载荷工况下牙周膜及牙槽骨松质骨应力分布。对于Y向应力,牙齿两侧牙周膜及牙槽骨松质骨张力、压力区清晰可分;对于von Mises应力,牙齿两侧牙周膜及牙槽骨松质骨分布基本对称,无法区分张力和压力区。

图3为侧向正畸力+振动组合载荷工况下牙周膜和牙槽骨松质骨Y向应力-时间曲线。

(1) 牙周膜A、B、C、D 4个区域Y向应力都呈现周期性变化,与加载的机械振动周期一致。A区Y向最大应力为402.9 kPa,最小为390.8 kPa,表现为张应力状态;B区Y向最大应力为-394.1 kPa,最小为-405.3 kPa,表现为压应力状态;C区Y向最大应力为-198.2 kPa,最小为-207.0 kPa,表现为压应力状态;D区Y向最大应力为199.8 kPa,最小为191.3 kPa,表现为张应力状态。牙周膜A、B、C、D 4个区域区分明显,A、D区为张力区,B、C区为压力区。

(2) 牙槽骨松质骨A、B、C、D 4个区域Y向应力都呈现周期性变化,与加载的机械振动周期

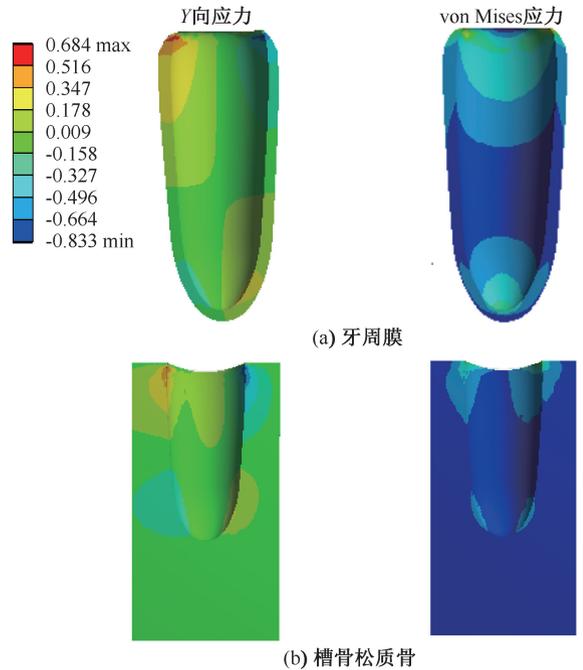


图2 牙周膜及牙槽骨松质骨应力分布

Fig.2 Stress distribution of periodontal ligament and cancellous bone of alveolar bone (a) Periodontal ligament, (b) Cancellous bone of alveolar bone

一致。A区Y向最大应力为360.5 kPa,最小为349.1 kPa,表现为张应力状态;B区Y向最大应力为-317.0 kPa,最小为326.5 kPa,表现为压应力状态;C区Y向最大应力为-156.3 kPa,最小为-163.6 kPa,表现为压应力状态;D区Y向最

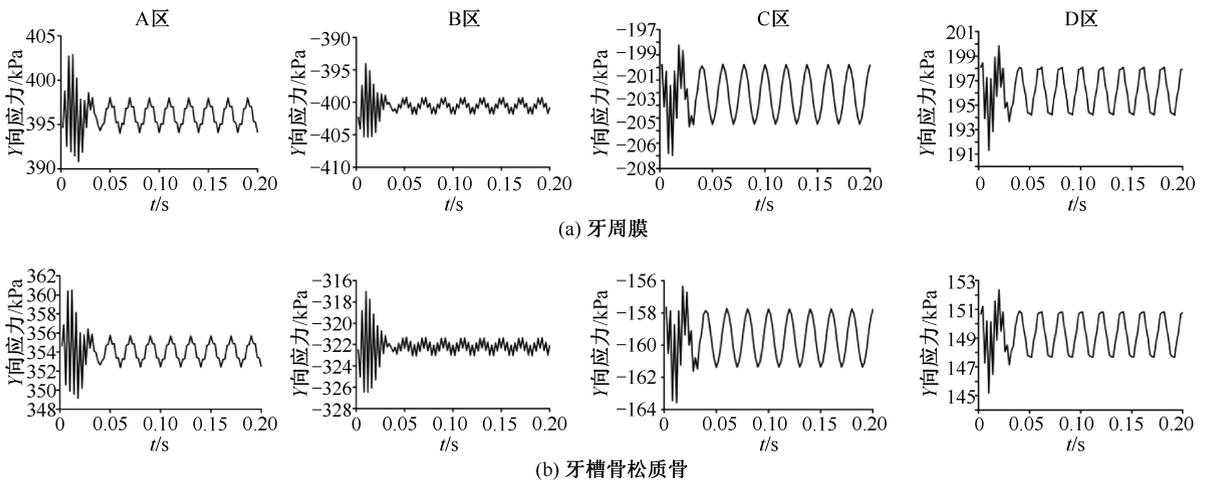


图3 牙周膜及牙槽骨松质骨Y向应力-时间曲线

Fig.3 Y-normal stress-time curve for periodontal ligament and cancellous bone of alveolar bone (a) Periodontal ligament, (b) Cancellous bone of alveolar bone

大应力为 152.3 kPa, 最小为 145.2 kPa, 表现为压应力状态。牙周膜牙槽骨松质骨 A、B、C、D 4 个区域区分明显, A、D 区为张力区, B、C 区为压力区。

图 4 所示为侧向正畸力+振动组合载荷工况下牙周膜及牙槽骨松质骨 von Mises 应力-时间曲线。牙周膜及牙槽骨松质骨 A、B、C、D 4 个区域 von Mises 应力都呈现周期性变化, 与加载的机械振动

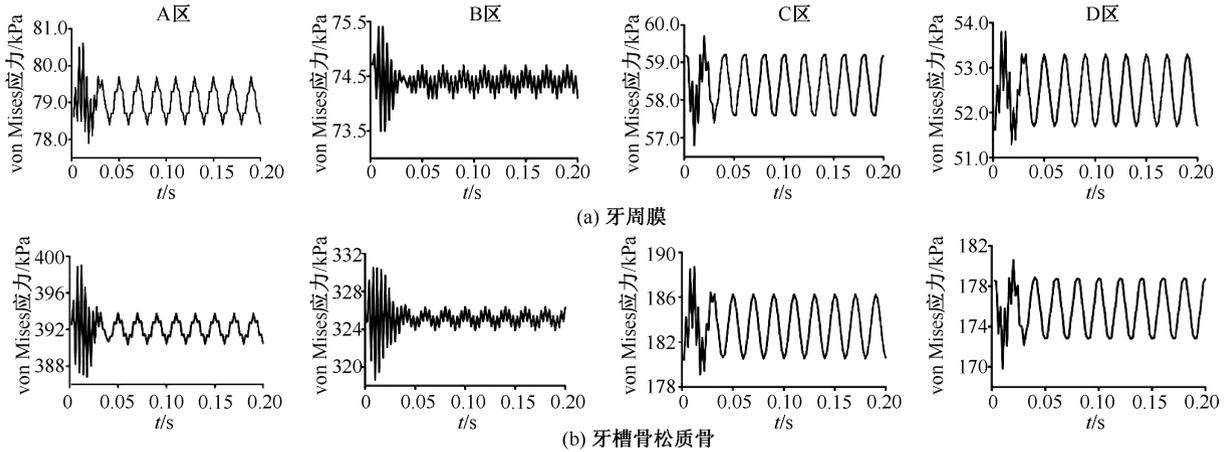


图 4 牙周膜及牙槽骨松质骨 von Mises 应力-时间曲线

Fig.4 Von Mises stress-time curve of periodontal ligament and cancellous bone of alveolar bone (a) Periodontal ligament, (b) Cancellous bone of alveolar bone

3 讨论

传统正畸牙移动治疗周期长, 副作用较多, 限制了患者治疗的可接受度。机械振动加速正畸牙移动具有非药物性、成本低、参数易于调节等优点, 吸引了很多学者的关注^[19]。当前机械振动加速正畸牙移动的研究多为实验研究, 从力学角度的研究尚不多见。

牙齿正畸是一个力生物学过程^[20]。加载的正畸力使牙齿移动到新位置, 牙槽骨及牙周组织通过改建使牙齿适应新位置。通过持续加载的正畸力, 牙槽骨及牙周组织不断改建, 使牙齿适应最终的目标位置, 从而完成牙齿正畸移动。可见在这个过程中, 加载侧向静态正畸力是触发因素, 实现牙槽骨改建的骨重建是一个由成骨和破骨细胞耦合执行完成的受到力学因素调控的生物学活动^[21]。对于正畸牙移动, 力学因素是触发启动机制, 一个受到力学因素调控的生物学活动是实现机制。

周期一致。牙周膜及牙槽骨松质骨 von Mises 应力分布 A 区与 B 区、C 区与 D 区差别不明显。von Mises 应力是畸变能密度强度理论相当应力, 不能识别应力环境的张或压特征。牙齿两侧的牙周膜及牙槽骨松质骨 von Mises 应力大小基本一致, 同时无法识别对载荷的响应幅度, 导致无论从应力特征上还是大小上均无法识别张力、压力区。

传统正畸牙治疗, 加载的侧向静态正畸力触发正畸牙移动, 同时启动基于骨的力学适应性的骨重建机制, 进行牙槽骨及牙周组织的改建。在骨重建的力生物学过程中, 力学信号的感知转导是一个重要环节^[22]。研究表明, 骨骼细胞的动载敏感性高于静载荷, 并且力学敏感性主要在于载荷频率而不是幅值大小^[8-9]。这说明在传统正畸治疗中, 虽然加载的侧向静态正畸力启动了正畸牙移动机制, 但是对于正畸牙移动实现生理机制骨重建的调控作用较弱, 骨重建活跃度较低。骨骼细胞对加载的低载高频振动载荷的高力学敏感性提升了骨重建的活跃度, 从而可以加速正畸牙移动。本文结果表明, 加载低载高频振动载荷后, 牙周膜及牙槽骨松质骨应力均呈现周期性变化, 易于被骨骼细胞感知。

在正畸牙治疗过程中, 加载正畸力后, 牙齿两侧牙槽骨及牙周组织分为张力和压力区, 牙槽骨及牙周组织的改建表现为张力区骨量增加, 压力区骨量减少。本文结果表明, 加载静态正畸力与低载高

频振动组合载荷后, Y 向应力牙周膜、牙槽骨松质骨 4 个区域依然清晰可分, 没有改变张力和压力区的力学状态, 即不会改变牙槽骨及牙周组织改建的骨量增减方向。该结果提示, 加载的动静组合载荷基本没有影响正畸的启动机制, 同时加速了正畸牙移动实现机制。

在骨重建的力生物学调控机制中, 表征力学环境的力学激励是力学机制调控因子, 它是一个重要的调控参数。研究者采用不同力学环境表征量作为力学激励, 提出不同的骨重建模型^[23]。本文发现, 牙周膜、牙槽骨 Y 向应力与 von Mises 应力均为周期性变化; 但对于 von Mises 应力, 由于不能识别应力的张或压特征, 同时在牙周膜、牙槽骨松质骨张力、压力区大小区分不明显。该结果提示, 在正畸生物力学领域中, Y 向应力或许是一个较为合适的力学环境表征量。

另外, 从力学角度看, 对于周期载荷, 同样振幅条件下相对于对称循环, 非对称循环会导致疲劳寿命的降低^[11-12]。本文发现, 加载动静组合载荷后, 牙周膜、牙槽骨松质骨 Y 向应力均为非对称周期性变化。从工程角度看, 动静组合载荷会增强骨组织的疲劳微损伤, 而微损伤也可以启动骨重建^[10]。该结果提示, 基于微损伤骨重建理论, 动静载荷也可促进骨重建。

4 结论

侧向静态正畸力与低值高频机械振动载荷组合的动静载荷应是一个有效加载正畸牙移动的物理方法, 但加载时应注意振动载荷的幅值大小和频率。幅值大小不应影响组合载荷加载后张力、压力区的区分, 保证牙周组织改建的方向; 频率应充分考虑骨骼细胞的力学敏感性。本文仅从力学角度讨论动静组合载荷加速正畸牙移动的机理, 但正畸牙移动是一个生理活动, 后续研究还应结合动物或临床实验进行深入探讨。

参考文献:

[1] CHOI SH, KIM B, CHA JY, et al. Impact of malocclusion and common oral diseases on oral health-related quality of life in young adults [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2015, 147(5): 587-595.

[2] CHEN M, FENG ZC, LIU X, et al. Impact of malocclusion

on oral health-related quality of life in young adults [J]. *Angle Orthod*, 2015, 85(6): 986-991.

[3] SKIDMORE KJ, BROOK KJ, THOMSON WM, et al. Factors influencing treatment time in orthodontic patients [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2006, 129(2): 230-238.

[4] UNNAM D, SINGARAJU GS, MANDAVA P, et al. Accelerated orthodontics: An overview [J]. *J Den Craniofac Res*, 2018, 3(1): 1-8.

[5] TAKANO-YAMAMOTO T, SASAKI K, FATEMEH G, et al. Synergistic acceleration of experimental tooth movement by supplementary high-frequency vibration applied with a static force in rats [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 1-14.

[6] WOODHOUSE NR, DIBIASE AT, JOHNSON N, et al. Supplemental vibrational force during orthodontic alignment: A randomized trial [J]. *J Dent Res*, 2015, 94(5): 682-689.

[7] GARLET TP, COELHO U, SILVA JS, et al. Cytokine expression pattern in compression and tension sides of the periodontal ligament during orthodontic tooth movement in humans [J]. *Eur J Oral Sci*, 2007, 115(5): 355-362.

[8] LANYON LE, RUBIN CT. Static vs dynamic loads as an influence on bone remodeling [J]. *J Biomech*, 1984, 17(12): 897-905.

[9] JUDEX S, LEI X, HAN D, et al. Low-magnitude mechanical signals that stimulate bone formation in the ovariectomized rat are dependent on the applied frequency but not on the strain magnitude [J]. *J Biomech*, 2007, 40(6): 1333-1339.

[10] LEE TC, STAINES A, TAYLOR D. Bone adaptation to load: Microdamage as a stimulus for bone remodeling [J]. *J Anat*, 2003, 201(6): 437-446.

[11] HOU SQ, XU JQ. Relationship among S-N curves corresponding to different mean stresses or stress ratios [J]. *J Zhejiang Univ Sci A*, 2015, 16(11): 885-893.

[12] 程军圣, 袁毅, 喻镇涛, 等. 考虑平均应力效应的 Tovo-Benasciutti 疲劳寿命预测模型 [J]. *中国机械工程*, 26(2): 196-199.

[13] HORINA JL, RIETBERGEN B, LULIC JT. Finite element model of load adaptive remodelling induced by orthodontic forces [J]. *Med Eng Phys*, 2018, 62: 63-68.

[14] QIAN H, CHEN J, KATONA TR. The influence of PDL principal fibers in a 3-dimensional analysis of orthodontic tooth movement [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2001, 120(3): 272-279.

[15] RUDOLPH DJ, PMG W, SAMEISHIMA GT. A finite element model of apical force distribution from orthodontic tooth movement [J]. *Angle Orthod*, 2001, 71(2): 127-131.

- [16] HINTERKAUSEN M, BOURAUUEL C, SIEBERS G, *et al.* *In vitro* analysis of the initial tooth mobility in a novel optomechanical set up [J]. *Med Eng Phys*, 1998, 20(1): 40-49.
- [17] AMMAR HH, NGAN P, CROUT RJ, *et al.* Three-dimensional modeling and finite element analysis in treatment planning for orthodontic tooth movement [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2011, 139(1): e59-e71.
- [18] LIAO ZP, ELEKDAG-TURK S, TURK T, *et al.* Computational and clinical investigation on the role of mechanical vibration on orthodontic tooth movement [J]. *J Biomech*, 2017, 60: 57-64.
- [19] CHIDCHANOK L, PUSSADEE P, ANUTE P. Vibratory stimulus and accelerated tooth movement: A critical appraisal [J]. *J World Fed Orthod*, 2018, 7(3): 106-112.
- [20] 张维奕, 王超, 杨崇实. 皮质骨切开辅助大鼠正畸牙齿移动有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(1): 48-54.
- ZHANG WY, WANG C, YANG CS. Finite element analysis on corticotomy-facilitated orthodontic tooth movement in rat [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(1): 48-54.
- [21] 罗睿, 焦飞, 孙青, 等. 正畸与咬合力作用下大鼠牙槽骨内液体流动的数值模拟[J]. *医用生物力学*, 2020, 35(1): 57-63.
- LUO R, JIAO F, SUN Q, *et al.* Numerical simulation on fluid flow within rat alveolar bone under orthodontic and occlusal loading [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(1): 57-63.
- [22] 王大维, 王浩, 董福生. 不同应力刺激对成骨细胞影响的研究进展[J]. *中国骨质疏松杂志*, 2016, 22(5): 652-656.
- [23] 程亮, 王冬梅, 王成焘. 骨重建数值仿真中的控制方程[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(4): 417-422.
- CHENG L, WANG DM, WANG CT. Review of bone remodeling criteria in numerical simulation [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(4): 417-422.

· 简讯 ·

《医用生物力学》入编 2020 版《中文核心期刊要目总览》

2021年3月,本刊编辑部收到《中文核心期刊要目总览》2020年版编委会通知:依据文献计量学的原理和方法,经研究人员对相关文献的检索、统计和分析,以及学科专家评审,《医用生物力学》入编《中文核心期刊要目总览》2020年版(即第9版)之(基础医学)类核心期刊。《医用生物力学》现为中文核心期刊(北大核心)、中国科技核心期刊(统计源期刊),以及《中国科学引文数据库》(CSCD)、荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)收录期刊,这些成绩是对本刊发表的论文学术价值和影响力的充分肯定。感谢广大作者、读者对本刊的支持与厚爱!感谢主编、编委会和审稿专家的辛勤付出!《医用生物力学》杂志将再接再厉,更好地服务于国内生物力学科研人员和工作,并向世界一流期刊看齐,不断实现期刊的新发展!

本刊编辑部