

文章编号: 1004-7220(2022)03-0473-06

膝关节单髁置换界面应力失效分析

马振¹, 吕林蔚¹, 刘璐², 王献抗², 张春秋¹, 叶金铨¹

(1. 天津理工大学 机械工程学院, 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 机电工程国家级实验教学示范中心, 天津 300384; 2. 嘉思特华剑医疗器械(天津)有限公司 天津市骨植入物界面功能化与个性化研究企业重点实验室, 天津 300190)

摘要:目的 分析骨水泥型胫骨假体平台界面应力, 确定界面应力损伤区域, 为临床单髁置换胫骨平台的应力失效问题提供参考。方法 通过人体动力学软件模拟完整周期的步态, 获得膝关节的承力条件; 利用医学影像及三维重建软件建立完整的膝关节模型并进行单髁置换; 通过有限元法分析单髁置换后胫骨假体平台界面应力的分布规律。结果 步态下膝关节的力和角度随时间呈周期性变化, 1.3 s 为 1 个周期, 膝关节合力峰值为 760 N; 界面最大剪切应力为 11.82 MPa、最大拉应力 6.849 MPa, 均发生在假体-骨水泥界面的内侧前端拐角处; 对于界面的最大应力, 钛合金假体低于不锈钢假体。结论 假体的弹性模量减小可以降低界面最大主应力, 从界面应力考虑, 钛合金假体优于不锈钢假体; 胫骨假体平台界面损伤区域主要在内侧前、后端拐角和外侧中端处, 故提高该区域假体-骨水泥结合能力能防止单髁膝关节胫骨假体平台松动。研究结果对临床中单髁术后胫骨假体平台松动预防具有实际意义。

关键词: 界面应力; 单髁膝关节置换; 骨水泥; 假体松动; 步态仿真

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.03.014

Failure Analysis on Interface Stress in Unicompartmental Knee Arthroplasty

MA Zhen¹, LÜ Linwei¹, LIU Lu², WANG Xiankang², ZHANG Chunqiu¹, YE Jinduo¹

(1. National Experimental Teaching Demonstration Center of Electromechanical Engineering, Tianjin Key Laboratory of Advanced Electromechanical System Design and Intelligent Control, College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Bone Implant Interface Functionalization and Personalization Research Enterprise, Just Huajian Medical Equipment (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300190, China)

Abstract: **Objective** To analyze interface stress of cemented tibial prosthesis platform and determine the interface stress damage area, so as to provide references for stress failure of tibial platform in clinical single condylar replacement. **Methods** The full cycle gait was simulated by human dynamics software to obtain the load-bearing condition of knee joint. A complete model of the knee joint was established by medical imaging and three-dimensional (3D) reconstruction software, and unicompartmental replacement was performed. The distribution of interfacial stress of tibial prosthesis platform after single condylar replacement was analyzed by finite element method. **Results** In gait, force and angle of the knee joint changed periodically with time, a cycle lasted 1.3 s,

收稿日期: 2021-07-23; 修回日期: 2021-08-20

基金项目: 天津市科技支撑重点项目(18YFZCSY00890, 19YFZCCG00410), 天津市科技计划项目生物医学工程科技重大专项(18ZXSGSY00010), 第三批天津市人才发展特殊支持计划-高层次创新创业团队

通信作者: 张春秋, 教授, E-mail: zcquarter@163.com

and the peak of knee joint resultant force was 760 N. The maximum shear stress of the interface was 11.82 MPa and the maximum tensile stress was 6.849 MPa, both occurred at inner front end of the corner of prosthesis cement interface. The maximum interface stress of titanium alloy prosthesis was lower than that of stainless steel prosthesis. **Conclusions** The decrease in elastic modulus of prosthesis can reduce the maximum principal stress at the interface. Considering the interface stress, titanium alloy prosthesis is better than stainless steel prosthesis. The area of tibial prosthetic platform interface damage is mainly at the medial anterior and posterior corners and lateral middle ends, so improving the ability of prosthesis cement bonding in this area can prevent the loosening of tibial prosthesis of unicompartmental knee joint. The findings have practical implications for the prevention of tibial prosthetic platform loosening after unicompartmental knee arthroplasty in clinic.

Key words: interface stress; unicompartmental knee arthroplasty (UKA); bone cement; prosthesis loosening; gait simulation

由于单髁膝关节置换 (unicompartmental knee arthroplasty, UKA) 在膝关节炎后期重建梯度治疗中的独特优势, 得到国内外越来越多骨科医生和患者的认可^[1]。目前临床应用较多的是骨水泥型 UKA, 但由于其术后过高的翻修率和较差的长期疗效, 许多学者对其临床效果持怀疑态度。Dyrhovden 等^[2]对 UKA 与全膝关节置换术 (total knee arthroplasty, TKA) 10~20 年生存率进行对比研究, 结果发现, UKA 术后具有更高的翻修率。骨水泥型 UKA 并发症主要包括胫骨平台内侧骨折、胫骨假体松动。其中, 胫骨假体组件松动的原因很复杂, 除去感染、疾病等因素, 无菌性松动是最常见的远期并发症, 而无菌性松动与胫骨假体平台界面应力分布有直接关系。

针对 UKA 翻修率高和长期疗效差的问题, 有学者利用有限元方法进行相关分析。马新硕等^[3]比较分析单髁膝关节胫骨元件固定柱不同几何形状对胫骨应力分布的影响; 贾迪等^[4]研究膝关节表面应力变化; 李鹏翔^[5]对膝关节前交叉韧带断裂单髁置换生物力学特性进行分析, 研究结果为临床膝关节前交叉韧带断裂单髁置换术的方案和半月板假体优化设计建立理论基础; 栗智远^[6]针对单髁置换术胫骨假体轴位旋转的三维有限元研究结果表明, 胫骨假体轴位旋转在中立位至外旋 3° 之间可获得更好的生物力学和运动学表现, 可能减少胫骨假体松动等并发症。膝关节单髁置换是一种专业性要求较高的手术。Baker 等^[7]通过临床统计 23 400 例膝关节置换术后的随访结果发现, 由于医生经验水平不同, 导致单髁膝关节置换术效果存在不理想和

翻修率高等问题。高广涵等^[8]对牛津膝胫骨假体覆盖与旋转对手术效果的影响以及术后出现假体下沉、松动等并发症进行总结。Wang 等^[9]通过调查牛津膝假体在中国患者中的情况, 给出了适合中国人单髁假体的最佳尺寸, 降低了胫骨假体由于外探和旋转导致的术后翻修率。但这些研究大多集中在牛津膝单髁假体几何形状尺寸或外科医生技术等因素上, 对胫骨假体平台界面 (假体-骨水泥-骨) 的应力分析研究报道较少。

本文对膝关节单髁置换后胫骨假体平台界面应力进行失效分析研究。采用有限元法研究单髁膝关节置换后胫骨假体平台界面应力的分布规律, 同时比较分析胫骨假体平台的界面应力与界面强度, 从而确定损伤区域, 为验证临床膝关节单髁置换术可靠性以及解决置换后胫骨平台松动等问题建立理论基础。

1 材料与方法

1.1 单髁置换模型

左膝关节影像资料来自 1 名 25 岁男性志愿者, 身高 175 cm, 体重 72 kg。将磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 及计算机断层 (computed tomography, CT) 二维影像扫描数据以 DICOM 格式保存, 并将数据导入医学软件 Mimics 和 3-matic 进行图像处理, 通过阈值设定、腔隙填充、区域增长等操作描绘并提取出膝关节的所有结构组织, 包括股骨、胫骨、腓骨、髌骨及其软骨, 以及半月板、十字韧带、内外侧韧带、髌韧带, 其中胫骨由松质骨和皮质骨组成。使用 Geomagic Studio 软件处理粗糙的模

型表面从而得到精确的曲面。最后,模型导入三维软件 SolidWorks 进行实体化处理。

牛津膝单髁假体由股骨假体、半月板、胫骨假体组成。股骨侧采用双柱式设计。用三维软件进行单间室膝关节置换术后的建模(见图1)。参考临床中牛津膝单髁置换操作手册规范,选择3号牛津膝单髁模型^[10-11]。在胫骨平台冠状位下方6 mm,后倾5°对模型进行截骨。定义中性位下肢对齐为0°倾角,进行零件的装配。骨水泥连接单髁假体与骨,骨水泥厚度为1 mm^[12]。

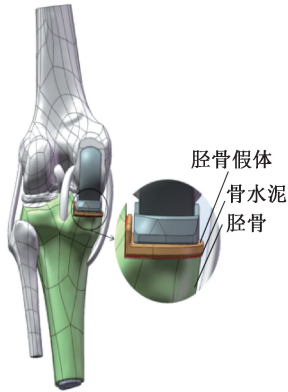


图1 单髁膝关节置换术后三维建模

Fig.1 Three-dimensional modeling after unicompartmental knee arthroplasty

1.2 LifeMOD 人体动力学仿真

LifeMOD 是一款基于 MSC.ADAMS 的人体动力学开发软件,将人体各个组织设置为多刚体系统进行相关的生物力学研究。在建模时可以根据实际需要,调整模型的身高、体重、性别、年龄等参数进行快速建模,并对模型自定义设置时间(Times)和步数(Steps)进行步态仿真,最后在结果(Result)模块中输出需要的结果参数,包括髌、膝、踝关节各面的关节力和运动角度等全部参数。通过动态仿真分析获得各种运动状态过程中人体所受到的载荷,为骨骼的力学状态研究提供条件。

本文建立的多刚体步态分析模型与有限元仿真模型的基本参数相同,分析时间为2.5 s,平均步速为0.6 m/s。对模型进行无负重的步态分析,模拟正常人在日常生活中的下肢运动,最终得到膝关节横断面的关节力及矢状面的关节运动角度(见图2)。本模型主要研究对象为左膝关节,且膝关节相位为伸直相位,根据步态分析结果,在无

负重情况下膝关节力和角度呈周期性变化,1个周期的时间约为1.3 s,在0.1 s左右时,左膝关节处于伸直状态,此时左膝关节最大峰值力约为760 N。

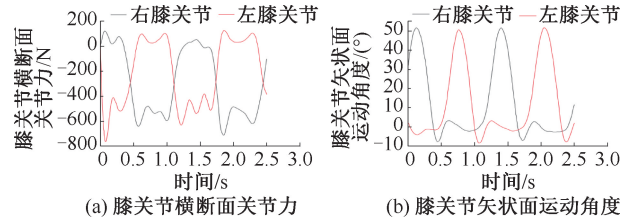


图2 步态仿真结果

Fig.2 Gait simulation results (a) Transverse joint force of the knee joint, (b) Sagittal motion angle of the knee joint

1.3 有限元模型建立及分析

将上述建立的单髁置换的三维实体模型以.x_t格式导入 ABAQUS 中,建立有限元模型。对膝关节各部件设置材料属性,钛合金和不锈钢材料的力学性能用于假体材料,同时对除半月板之外的各个部件定义为各向同性的线性材料^[13-17](见表1);由于半月板的基质胶原纤维在不同部位有不同的排列方式,故将半月板视为线弹性横观各向同性材料^[18-19]。半月板弹性模量 E_x 、 E_r 、 E_θ 分别为20、20、140 MPa; γ_{xz} 、 $\gamma_{z\theta}$ 、 $\gamma_{r\theta}$ 分别为0.3、0.3、0.2; G_{xz} 、 $G_{z\theta}$ 、 $G_{r\theta}$ 均为57.7 MPa。

在施加载荷时为了避免应力集中,同时正确模拟单髁置换后膝关节直立状态下承受体载荷时的生物力学特性,通过股骨几何中点施加竖直向下的集中力,载荷大小为步态仿真所得竖直状态下膝关节峰值力。

表1 各部件材料参数

Tab.1 Material parameters of all parts

材料	E /MPa	ν	材料	E /MPa	ν
皮质骨	12 000	0.30	髌韧带	87	0.30
松质骨	350	0.25	骨水泥	4 000	0.33
软骨组织	5	0.46	半月板衬垫	685	0.40
前十字韧带	116	0.30	钛合金假体	110 000	0.32
后十字韧带	87	0.30	不锈钢假体	20 0000	0.35
内外侧韧带	48	0.30			

注: E 为弹性模量, ν 为泊松比; 不包括半月板。

单髁膝关节假体置换后假体之间虽然存在关

节液,能在一定程度上减小摩擦,但不会达到绝对的无摩擦接触。因此,本文设定假体之间为库伦摩擦接触,摩擦因数为0.07^[20]。健康侧的接触条件采用有限滑动、无摩擦、无穿透的硬接触算法。骨与软骨、韧带与骨、假体与骨水泥以及骨水泥与骨均为绑定接触,其他部分设置为面面接触。胫腓骨的远端自由度被完全约束。股骨只约束远近方向上的自由度。设置完成的膝关节单髁置换有限元模型如图3所示。



图3 单髁膝关节置换有限元模型

Fig.3 Finite element model of unicompartmental knee arthroplasty

本文使用的膝关节模型通过施加竖直向下1 kN载荷和抽屉实验(anterior drawer test, ADT)的仿真结果都与人体膝关节实验结果较为接近,从而验证了模型的有效性,为有限元计算结果准确性奠定基础^[21]。

2 结果

2.1 不同材料假体-骨水泥-骨界面应力比较

在上述载荷和边界条件下,计算胫骨假体平台界面假体-骨水泥和骨水泥-胫骨接触区域的拉压应力和剪切应力。在“压力”命令下,负值表示拉应力,正值表示压应力。在相同载荷和边界条件下,选用不锈钢或钛合金作为假体材料时,界面处的拉压应力、剪切应力如图4所示。

仿真结果表明,最大拉应力、压应力、剪切应力均发生在假体-骨水泥界面,且发生在该界面的边缘。最大压应力为7.349 MPa,发生在界面的前端。最大剪切应力为11.82 MPa,最大拉应力6.849 MPa,均出现在假体-骨水泥假体界面前端拐角处。

钛合金作为假体材料时,界面的最大应力低于不锈钢。这是因为钛合金材料的弹性模量($E =$

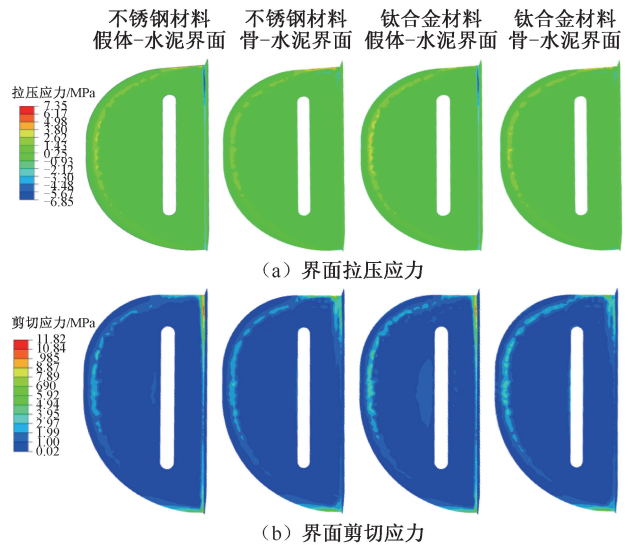


图4 不同假体材料及不同界面应力分布

Fig.4 Stress distributions on different prosthesis materials and at different interface (a) Interfacial tensile and compressive stress, (b) Interfacial shear stress

110 GPa) 低于不锈钢材料($E = 200$ GPa),而且钛合金材料的弹性模量与结构中其他材料(皮质骨、松质骨、骨水泥)的弹性模量更接近。这与 El-Sheikh 等^[22]的研究结果相似,减小种植材料的弹性模量可以降低最大主应力。

2.2 确定界面损伤区域

通过数值分析得出在假体-骨水泥-骨界面的应力,与界面的抗拉和抗剪强度值比较,以确定损伤区域。界面强度来自 Sait 等^[23]利用与人骨弹性模量相似、年龄小于3岁的牛骨所得出的实验数据。钛合金假体-骨水泥界面最高拉伸强度为1.4 MPa,剪切强度为3.53 MPa。

以钛合金为假体材料,对于假体-骨水泥界面,受拉应力大于1.4 MPa区域为黑色,受剪应力大于3.53 MPa区域为黑色,损伤区域如图5所示。分析表明,在股骨上施加载荷的作用下,最大拉应力、剪切应力均发生在假体-骨水泥界面内侧前端拐角处,并超过其应力强度,界面损伤从此处开始,从而破坏假体与骨水泥的交叉,导致假体表面与水泥分离,随着时间的推移损伤区域扩大到界面内侧后端拐角和外侧中端,最终假体-骨水泥界面出现脱粘。

3 讨论

骨水泥型假体无菌性松动是骨水泥置换术长

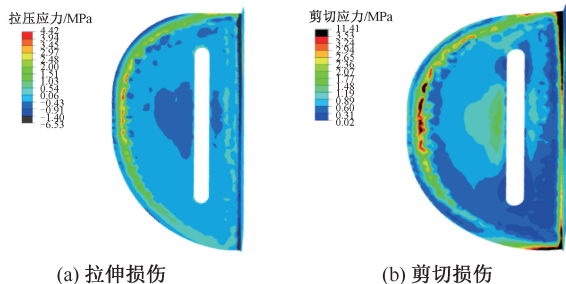


图5 钛合金假体-骨水泥界面损伤区域

Fig.5 Damage area of titanium alloy prosthesis bone cement interface (a) Tensile damage, (b) Shear damage

期存在的问题之一,它的发生是人体承受动态载荷作用累积的结果^[24]。产生位置主要是材料中的最薄弱环节,而假体-骨水泥-骨界面就是整个关节置换结构的薄弱位置。

本文探讨两种不同假体材料所产生的界面应力。结果表明,假体材料的弹性模量越接近骨和骨水泥的弹性模量,所产生的界面应力就越小。对于单髁胫骨假体平台无菌性松动导致假体的使用寿命短翻修率高等问题,本文又对单髁胫骨假体平台进行失效分析,将界面强度与有限元法确定的界面应力进行比较,从而确定损伤区域。结果表明,损伤从假体-骨水泥界面内侧前端拐角处开始,界面的损伤区域主要集中在内侧前、后端拐角和外侧中端处。

本文研究结果与相关的临床研究具有较强的 consistency。黄迅悟等^[25]对62例骨水泥型UKA进行48个月的中期随访,5例患者出现胫骨假体松动且开始发生松动位置均出现在平台内侧前端,推测发生的原因主要与该位置应力过高有关。Pegg等^[26]通过建立UKA术后有限元模型发现,胫骨平台界面高应力集中在截骨面内侧,与本文仿真结果有较强的一致性。另外,在TKA翻修术中,有研究也报告了大多数胫骨假体无菌松动的情况下,胫骨假体平台在假体-骨水泥界面处发生脱粘^[27-29]。上述研究结果表明,提高假体与骨水泥结合能力可以有效防止胫骨假体平台松动。

与假体-骨水泥界面相比,骨-骨水泥界面应力较小,而且骨作为智能材料具有自我修复能力,当骨的自我修复能力超过裂纹扩展能力时骨-骨水泥界面仍能保持稳定。如果假体-骨水泥界面产生损伤脱粘时,界面所承受的应力会由于接触面积减小而增大,

加剧界面裂纹扩展;当骨的自我修复能力低于裂纹扩展时,由于时间积累,最终导致整个假体松动分离。因此,提高假体与骨水泥界粘强度可以有效地防止松动,从而延长假体使用寿命降低翻修率。

研究表明,通过抛光、多孔涂层和喷砂粗糙纹理等假体表面处理方法,可以提高假体与骨水泥的结合能力^[30]。Pittman等^[31]对全膝关节假体表面粗糙度开展力学研究,并证明假体骨水泥结合强度随着表面粗糙度的增加而增加。Kutzner等^[29]通过病例对照研究和恢复分析报告发现,相对较低的表面粗糙度使胫骨假体平台更容易发生机械性松动。Sang等^[32]比较全膝关节胫骨假体表面粗糙度对假体存活率的影响,结果发现,当假体固定在松质骨中时,通过增加表面粗糙度来加强假体-骨水泥界面容易损伤区域的结合是一个更好的临床选择。因此,本文认为,在易损区域对胫骨平台表面进行有效粗糙处理是防止单髁膝关节胫骨假体平台松动一个有潜力的方法。

本研究存在一些局限性:① 本文有限元模型的基础是CT和MRI图像,这导致模型有可能存在个体因素,影响结果的外延性。② 模型的材料属性大多采用均质的线弹性材料。③ 虽然是以步态分析结果为边界条件对模型进行约束加载,但是均采用静态加载分析,只分析了步态过程中的伸直状态。有关单髁置换后爬楼梯或者起立过程中界面应力的分析,将是未来的研究目标。

参考文献:

- [1] EMERSON RH, HIGGINS LL. Unicompartmental knee arthroplasty with the oxford prosthesis in patients with medial compartment arthritis [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2008, 90(1): 118-122.
- [2] DYRHOVDEN GS, LYGRE S, BADAWY M, *et al.* Have the causes of revision for total and unicompartmental knee arthroplasties changed during the past two decades? [J]. *Clin Orthop Relat R*, 2017, 475(7): 1874-1886.
- [3] 马新硕,姚杰,王慧枝,等.单髁膝关节置换胫骨元件不同固定柱形状的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(2): 76-82.
MA XS, YAO J, WANG HZ, *et al.* Finite element analysis on different geometric shapes of tibial component pegs in unicompartmental knee arthroplasty [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(2): 76-82.
- [4] 贾笛,李彦林,杨龄坚,等.单髁置换术后膝关节内外侧间

- 室应力变化有限元分析[J]. 中国运动医学杂志, 2017, 36(10): 852-857.
- [5] 李鹏祥, 赵改平, 夏费一, 等. 膝关节前交叉韧带断裂单髁置换生物力学特性的有限元分析[J]. 医用生物力学, 2020, 35(1): 76-82.
- LI PX, ZHAO GP, XIA FY, *et al.* Finite element analysis on biomechanical properties of unicompartmental knee arthroplasty in ACL fracture of the knee joint [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(1): 76-82.
- [6] 粟智远. 单髁置换术胫骨假体轴位旋转的三维有限元研究[D]. 泸州: 西南医科大学, 2020.
- [7] BAKER P, JAMESON S, CRITCHLEY R, *et al.* Center and surgeon volume influence the revision rate following unicompartmental knee replacement [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2013, 95(8): 702-709.
- [8] 高广涵, 曹光磊. 关于牛津单髁胫骨假体覆盖与旋转的研究进展[J]. 中华关节外科杂志(电子版), 2019, 13(6): 745-749.
- [9] XING WF, MING XH, TONG M, *et al.* Prosthesis size distribution in Oxford phase III unicompartmental knee arthroplasty: Based on more than 1900 Chinese patients [J]. *J Orthop*, 2021, 25: 230-236.
- [10] GOODFELLOW J, O'CONNOR J, PANDIT H, *et al.* Unicompartmental arthroplasty with the Oxford knee [M]. Berlin: Springer, 2012.
- [11] PANDIT H. The Oxford medial unicompartmental knee replacement using a minimally-invasive approach [J]. *J Bone Joint Surg*, 2006, 88-B(1): 54-60.
- [12] 左建林, 刘鹏, 王文军, 等. 全髁关节置换的骨水泥技术[J]. 国际骨科学杂志, 2008, 29(1): 18-20.
- [13] 王世雷. 压缩载荷下全膝关节软骨缺损和修复力学行为的实验研究及仿真分析[D]. 天津: 天津理工大学, 2019.
- [14] ZHU GD, GUO WS, ZHANG QD, *et al.* Finite element analysis of mobile-bearing unicompartmental knee arthroplasty: The influence of tibial component coronal alignment [J]. *Chin Med J*, 2015, 128(21): 2873.
- [15] 李盖敏. 基于人体膝关节建模的软骨力学特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [16] BAO H, ZHU D, GONG H, *et al.* The effect of complete radial lateral meniscus posterior root tear on the knee contact mechanics: A finite element analysis [J]. *J Orthop Sci*, 2013, 18(2): 256-263.
- [17] SINGHA S, HARSHAA AP. Analysis of femoral components of cemented total hip- arthroplasty [J]. *J Inst Eng*, 2014, 86(Supplement): 1-8.
- [18] FROST HM. A 2003 update of bone physiology and Wolff's law for clinicians [J]. *Angle Orthod*, 2004, 74(1): 3-15.
- [19] PATTIN CA, CALER WE, CARTER DR. Cyclic mechanical property degradation during fatigue loading of cortical bone [J]. *J Biomech*, 1996, 29(1): 69-79.
- [20] CROCKETT R, ROBA M, NAKA M, *et al.* Friction, lubrication, and polymer transfer between UHMWPE and CoCrMo hip-implant materials: A fluorescence microscopy study [J]. *J Biomed Mater Res Part A*, 2010, 89A(4): 1011-1018.
- [21] 李钟鑫. 膝关节单间室假体置换的生物力学研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2021.
- [22] EL-SHEIKH HF, MACDONALD BJ, HASHMI M. Material selection in the design of the femoral component of cemented total hip replacement [J]. *J Mater Process Technol*, 2002, 122(2-3): 309-317.
- [23] KOCÁK S, SEKERCIOGLU T. Experimental and numerical static failure analyses of total hip replacement interfaces [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2019, 233(11): 1183-1195.
- [24] DURIG N, PACE T, BROOME B, *et al.* Clinical outcomes of tibial components with modular stems used in primary TKA [J]. *Adv Orthop*, 2014, doi: 10.1155/2014/651279.
- [25] 黄迅悟, 冯会成, 孙继桐, 等. 膝关节单髁置换中期随访报告[J]. 中华关节外科杂志(电子版), 2013, 7(4): 448-453.
- [26] PEGG EC, WALTER J, MELLON SJ, *et al.* Evaluation of factors affecting tibial bone strain after unicompartmental knee replacement [J]. *J Orthop Res*, 2013, 31(5): 821-828.
- [27] MIKULAK S. Loosening and osteolysis with press-fit condylar posterior-cruciate-substituting total knee replacement [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2001, 83-A(3): 398-403.
- [28] HAN HS, KANG SB, YOON KS. High incidence of loosening of the femoral component in legacy posterior stabilised-flex total knee replacement [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2007, 89(11): 1457-1461.
- [29] KUTZNER I, HALLAN G, HØL PJ, *et al.* Early aseptic loosening of a mobile-bearing total knee replacement: A case-control study with retrieval analyses [J]. *Acta Orthopaedica*, 2017, 89(248): 1-7.
- [30] HUNG JP, BAI YW, HUNG CQ, *et al.* Biomechanical performance of the cemented hip stem with different surface finish [J]. *Appl Sci*, 2019, 9(19): 4082.
- [31] PITTMAN GT, PETERS CL, HINES JL, *et al.* Mechanical bond strength of the cement-tibial component interface in total knee arthroplasty [J]. *J Arthroplasty*, 2006, 21(6): 883-888.
- [32] SANG HK, MOON KH. Comparison of the clinical results of identically designed total knee prostheses with different surface roughnesses [J]. *Coatings*, 2020, 10(5): 486.