

文章编号: 1004-7220(2024)05-0881-08

# 功能梯度材料全踝关节假体力学响应的有限元分析

马杰<sup>1a</sup>, 李永胜<sup>1b</sup>, 陈静<sup>1a</sup>, 武晓刚<sup>1a</sup>, 林建英<sup>1a</sup>, 文云鹏<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 a. 生物医学工程学院; b. 机械与运载工程学院, 太原 030024; 2. 山西省华晋骨科医院, 太原 030401)

**摘要:** **目的** 研究分别植入径向和轴向功能梯度材料(functionally graded materials, FGM)踝关节假体后, 胫骨假体与胫骨远端松质骨的力学响应。 **方法** 使用3种 FGM, 分别为钛合金-生物活性玻璃复合 FGM(FGM-I)、钛合金-理想骨弹性材料复合 FGM(FGM-II)、钛合金-羟基磷灰石复合 FGM(FGM-III)。建立全踝关节置换三维有限元模型, 利用仿真软件 ABAQUS 基于 Fortran 进行二次开发, 通过改变体积分数, 在轴向和径向上调整所建功能梯度胫骨假体的力学特性。分析 FGM 轴向和径向胫骨假体植入后, 在站立位工况下胫骨假体与胫骨松质骨上的应力分布。 **结果** 与钛合金胫骨假体相比, 3种 FGM 均可有效减小胫骨假体上的应力集中, 其中 FGM-III 胫骨假体总体效果优于 FGM-I 和 FGM-II 胫骨假体, 且相对于轴向分布而言, FGM 沿径向分布可以有效降低假体的最大 von Mises 应力。对于胫骨松质骨, 3种 FGM 径向胫骨假体和 FGM-III 轴向胫骨假体均能有效增加其远端应力, 从而减轻松质骨上的应力遮挡, 其中 FGM-III 径向胫骨假体最为有效地改善了松质骨上的应力水平。 **结论** FGM-III 径向踝关节假体可以有效降低假体上的应力集中现象并减小应力遮挡效应, 以此达到延长假体寿命的目的, 具有潜在的应用前景。

**关键词:** 功能梯度材料; 踝关节假体; 应力遮挡; 有限元分析

中图分类号: R 318.01

文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.05.013

## Mechanical Response of Functionally Graded Materials Total Ankle Prosthesis: A Finite Element Analysis

MA Jie<sup>1a</sup>, LI Yongsheng<sup>1b</sup>, CHEN Jing<sup>1a</sup>, WU Xiaogang<sup>1a</sup>, LIN Jianying<sup>1a</sup>, WEN Yunpeng<sup>2</sup>

(1a. College of Biomedical Engineering; 1b. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Huajin Orthopaedic Hospital, Taiyuan 030401, China)

**Abstract: Objective** To study the mechanical response of tibial prostheses and the distal tibial cancellous bone after implantation of radial and axial functionally graded materials (FGM) into the ankle joint. **Methods** Three FGM were used: titanium alloy-bioactive glass composite FGM (FGM-I), titanium (Ti) alloy-ideal bone elastic composite FGM (FGM-II), and Ti alloy-hydroxylapatite composite FGM (FGM-III). A three-dimensional finite element model of total ankle arthroplasty (TAA) was established, and the simulation software ABAQUS was used for secondary development based on Fortran. By changing the volume fraction, the mechanical properties of the FGM tibial prosthesis can be adjusted both axially and radially. The stress distributions of the tibial prosthesis and cancellous bone after FGM axial and radial tibial component implantation in the standing position were analyzed. **Results** Compared with Ti alloy tibial prosthesis, three kinds of FGM could effectively reduce the stress concentration on the tibial prosthesis, and the overall effect of FGM-III tibial prosthesis was better than that

收稿日期: 2024-02-27; 修回日期: 2024-04-03

基金项目: 山西省自然科学基金委员会面上项目(202203021221076)

通信作者: 陈静, 高级实验师, E-mail: chenjing\_6151@163.com

of FGM-I and FGM-II tibial prosthesis; the radial distribution of FGM could effectively reduce the maximum von Mises stress of the prosthesis. For the tibial cancellous bone, the three types of FGM radial tibial prostheses and FGM-III axial tibial prostheses could effectively increase the distal stress, thus, relieving the stress shielding on the cancellous bone; the FGM-III radial tibial prosthesis was the most effective in improving the stress level of the cancellous bone. **Conclusions** FGM-III radial ankle prosthesis can effectively reduce the stress concentration phenomenon and the stress shielding effect on the prosthesis to prolong its life, with potential application prospects.

**Key words:** functionally graded materials (FGM); ankle prosthesis; stress shielding; finite element analysis

踝关节是由距小腿关节、下胫腓关节和距下关节组成的复合关节,在解剖学上具有独特的复杂性<sup>[1]</sup>。作为人体最为复杂的负重关节之一,踝关节结构状态异常易引发活动功能障碍和疼痛,其中创伤后占 54%,原发性骨关节炎占 19%,类风湿性关节炎占 14.6%<sup>[2]</sup>。以上疾病发展至中晚期,会产生踝关节骨性蜕变和力学微环境改变,在保守治疗无法改善症状的情况下,手术成为治疗的最终选择<sup>[3]</sup>。踝关节置换术起始于 20 世纪 70 年代,其因较高的失败率和难以预测的临床效果而备受争议,踝关节融合术成为治疗终末期踝关节炎的优先选择<sup>[4-5]</sup>。但是,随着足踝外科的发展,对足踝部解剖学、生物力学和运动学有了更深入的认识,配合手术器械技术的进步,全踝关节假体已得到越来越多的应用<sup>[6]</sup>。研究表明,相比于踝关节融合术,踝关节置换患者术后患者跛行减少、步态周期更正常<sup>[7-8]</sup>。踝关节置换可以重建踝关节功能,在保留踝关节功能上更有优势。因此,近年来临床愈发关注踝关节置换术。美国医疗卫生数据显示,踝关节置换年增长率为 16.37%,这意味着踝关节置换需求不断增长<sup>[9]</sup>。

相对于较为成熟的全髋关节和膝关节置换术来说,全踝关节置换(total ankle arthroplasty, TAA)出现的 50 年来发展较为缓慢<sup>[10]</sup>。多例随访研究显示,踝关节假体的存活率较低<sup>[11-13]</sup>。究其原因,踝关节假体硬度对 TAA 寿命和成功率有着很大的影响。目前,临床常用的踝关节假体材料多为钛合金和钴铬合金,这些金属材料的弹性模量远大于人骨,导致了对骨体部分的应力遮挡<sup>[14-15]</sup>。由于假体承担了大部分的载荷,故少部分载荷由骨承担,而骨骼是一个活组织,可以根据其化学和机械环境进行自我重建<sup>[16]</sup>。在重建过程中,载荷的

减少会导致骨骼失去结构强度,严重时造成骨质疏松,引起假体失效。

鉴于目前的踝关节假体部件与人体骨骼在力学特性上差异过大,极易引发应力遮挡,进而导致假体松动<sup>[17]</sup>,本文考虑使用功能梯度材料(functionally graded materials, FGM)对踝关节假体进行改良,建立正常足踝与植入不同 FGM 假体后足踝的有限元模型,分析不同材料假体下的踝关节应力分布状况,遴选出与胫骨相匹配的假体材料模型,为踝关节假体的进一步合理化设计提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 正常人足踝关节有限元模型的建立与分析

本文模型数据均来自于 1 名 25 岁健康女性志愿者(身高 168 cm,体质量 63 kg)。在获得志愿者下肢 CT 扫描数据后,应用 Mimics 10.01 与 3-matic 获得正常足踝的几何模型,导入 HyperMesh 14.0 (Altair 公司,美国)中进行网格划分,再将网格划分好的假体及骨骼模型导入有限元仿真软件 ABAQUS 6.14-4 (ABAQUS 公司,美国)中装配接触,按照人体双足站立工况进行静力学模拟分析。由于足间韧带具有不同的形态和截面尺寸,故通过不同数量的索单元(truss)为足踝有限元模型添加韧带部分。除软组织以外,足踝各部分均为各向同性线弹性材料,软组织采用 Mooney-Rivlin 超弹性模型,材料属性见表 1。

载荷工况为人体平衡站姿中立位时足踝的受力情况,参考样本对象体重,双足站立时左右足各承担人体 50% 负重,通过刚性底板对足底施加垂直向上的位移载荷,胫骨腓骨远端靠近膝关节处表面施加固定约束。在位移达到 3.7 mm 时,胫骨腓骨远端支反力达到 325 N,约为样本对象体重的 50%。

表 1 有限元模型分段的单元类型和材料特性

Tab. 1 element types and material characteristics of the finite element model segments

成分	$E/\text{MPa}$		$\nu$	横截面积/ $\text{mm}^2$				单元类别
骨骼 <sup>[18]</sup>	7 300		0.3	—				实体
软骨 <sup>[19]</sup>	1		0.4	—				实体
足底筋膜 <sup>[20]</sup>	350		—	58.6				索
韧带 <sup>[21]</sup>	260		—	18.4				索
地面	17 000		0.1	—				实体
软组织 <sup>[22]</sup>	$C_{10}$	$C_{01}$	$C_{20}$	$C_{11}$	$C_{02}$	$D_1$	$D_2$	实体
	0.085	-0.058	0.039	-0.023	0.009	3.652	0	

## 1.2 踝关节假体置换有限元分析

**1.2.1 踝关节假体有限元模型建立** 假体的机械结构参照 Inbone 全踝关节假体进行设计,由距骨假体、距骨柄、胫骨假体及聚乙烯衬垫组成。其中,距骨柄倾斜插入距骨头,胫骨柄插入胫骨内,聚乙烯衬垫置入胫骨假体附有的槽型结构中,假体的关节面部分则参考对象自身的关节面形状进行设计。在 SolidWorks 中构建人工踝关节假体的三维几何模型;将建立的人工踝关节假体模型和虚拟截骨后的骨骼模型导入 HyperMesh 中进行网格划分;将网格划分后的假体及骨骼模型导入 ABAQUS 中装配接触等设置,按照人体双足站立工况进行静力学模拟分析[见图 1(a)]。

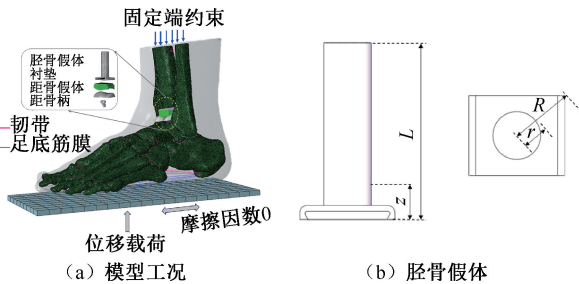


图 1 全踝关节置换足有限元模型及胫骨假体示意图

Fig. 1 Finite element model of TAR foot and schematic diagram of tibial prosthesis (a) Model operating conditions, (b) Tibial prosthesis

注:图 1(b)分别显示了胫骨假体主视图和俯视图。 $L$  为胫骨假体远端到近端的总长度, $Z$  为胫骨假体上任意一点在轴向上距假体胫骨平台末端的距离, $R$  为假体最外层到内核的距离, $r$  为胫骨假体上任意一点在径向上距假体内核的距离。

**1.2.2 功能梯度假体材料的本构关系** 对踝关节胫骨假体使用 ABAQUS 子程序分别完成 FGM-I、FGM-II、FGM-III 在假体径向和轴向的赋值。其中,钛合金-生物活性玻璃复合 FGM(FGM-I)、钛合金-理想骨弹性材料复合 FGM(FGM-II)、钛合金-羟基磷

灰石复合 FGM(FGM-III)的假体材料性能见表 2。

表 2 假体组件材料力学参数<sup>[24,25]</sup>

Tab. 2 Mechanical parameters of component materials

材料	$E/\text{GPa}$	$\nu$
钛合金	110	0.27
超高分子聚乙烯	1.016	0.46
理想骨修复材料	14.22	0.30
羟基磷灰石	2	0.30
生物活性玻璃	30	0.30

假体材料组分的体积分数从远端到近端的分布由以下公式决定:

$$V_1 = 1 - (z/L)^k \quad (1)$$

$$V'_1 = (z/L)^k \quad (2)$$

从外层到内核的分布则取决于如下公式:

$$V_2 = 1 - (r/R)^k \quad (3)$$

$$V'_2 = (r/R)^k \quad (4)$$

式中: $V_1$  为材料沿轴向赋值时钛合金的体积分数; $L$  为胫骨假体远端到近端的总长度; $z$  为胫骨假体上任意一点在轴向上距假体胫骨平台末端的距离。 $V'_1$  为材料沿轴向赋值时羟基磷灰石、理想骨修复材料或者生物活性玻璃材料的体积分数; $V_2$  为材料沿径向赋值时钛合金的体积分数; $R$  为假体最外层到内核的距离; $r$  为胫骨假体上任意一点在径向上距假体内核的距离[见图 1(b)]。 $V'_2$  为材料沿径向赋值时羟基磷灰石、理想骨修复材料或者生物活性玻璃材料的体积分数。 $k$  为控制胫骨假体材料组分变化的参数,本研究中, $k=1$ ,表示胫骨假体的材料组分呈线性变化。

假体材料组分的弹性模量和泊松比从远端到近端以及从外层到内核的分布由以下公式<sup>[23]</sup>决定:

$$E_0 = E_c \left[ \frac{E_c + (E_m - E_c) V_i^{\frac{2}{3}}}{E_c + (E_m - E_c) (V_i^{\frac{2}{3}} - V_i)} \right] \quad (5)$$

$$v = v_m V_i + v_c V'_i \quad (6)$$

式中:  $E_0$  为 FGM 的弹性模量;  $E_m$  为钛合金的弹性模量;  $E_c$  为羟基磷灰石、理想骨修复材料或者生物活性玻璃材料的弹性模量;  $v_m$  为钛合金泊松比,  $v_c$  为羟基磷灰石、理想骨修复材料或者生物活性玻璃材料的泊松比。当材料沿轴向赋值时, 式中  $i=1$ ; 而当材料沿径向赋值时, 式中  $i=2$ 。

在相同载荷及边界条件下, 对不同种类、不同梯度方向 FGM 踝关节假体的站立位工况进行模拟, 对比上述假体术后胫骨松质骨上 4 条路径上的力学响应以及胫骨假体上 4 条路径的应力分布变化, 比较 4 种假体材料对踝关节置换性能的影响, 分析假体优化的可行性。

### 1.3 实验

邀请模型数据来源志愿者赤足站立在 FootWork 动态足部测力台(上海伊沐医疗器械有限公司)上, 多次采集足底压力, 经过平均计算分析评估数据, 作为有限元模型结果有效性验证的对照。

## 2 结果

### 2.1 正常踝关节系统足底压力分布

足底压力由于其可测量性, 使之测量结果与仿真结果的对标成为验证足部有限元模型准确性的一种常用方法。本文有限元结果显示, 足底压力分布主要在足跟和第 2、3 跖骨下方, 分布规律与实验所得结果一致, 最大足底压力 (235.9 kPa) 位于足跟, 为实验测定最大足底压力的 128.2%。胫骨下关节面最大接触应力 2.2 MPa, 与 Anderson 等<sup>[26]</sup> 实验结果 (2.74 MPa) 基本一致。以上结果表明, 本文建立的有限元模型及其分析结果具有可靠性。

### 2.2 FGM 胫骨假体应力分布

在站立位工况阶段, 钛合金和 FGM-I、FGM-II 和 FGM-III 轴向、径向假体中的应力分布模式大致相同, 主要集中在胫骨假体柄上端和胫骨假体平台。相比使用钛合金材料的胫骨假体, 使用 FGM 胫骨假体的最大 von Mises 应力有明显降低。与钛合金胫骨假体相比, FGM 胫骨假体上的应力不仅降低, 且其应力分布更为均匀。其中, 使用 FGM-I 径向假体与轴向假体的最大 von Mises 应力分别降低了 6.6% 和 2.4%, 使用 FGM-II 径向假体和轴向假体的最大 von Mises 应力分别降低了 12.5% 和

4.4%, 使用 FGM-III 径向假体和轴向假体的最大 von Mises 应力分别降低了 44.2% 和 16.8%。以上数据表明, 使用了 3 种 FGM 的胫骨假体均可有效减小假体上的应力集中。其中, FGM-III 胫骨假体总体上的效果优于使用了 FGM-I 和 FGM-II 的两种假体。且相对轴向分布而言, FGM 沿径向分布可以有效降低假体的最大 von Mises 应力(见图 2)。

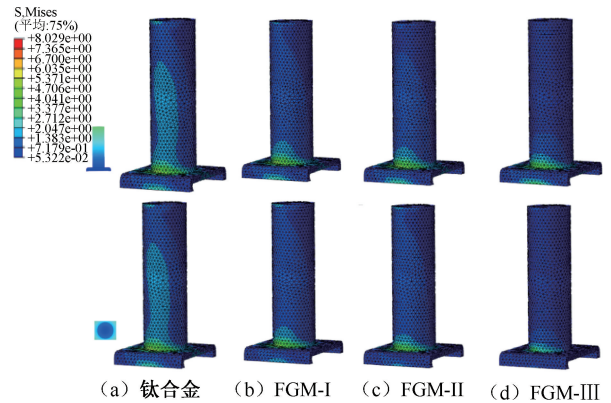


图 2 站立位工况下各组全踝关节置换模型胫骨假体应力云图  
Fig. 2 Stress nephogram of tibial prosthesis in TAK models in standing position (a) Titanium tibial prosthesis, (b) FGM-I tibial prosthesis, (c) FGM-II tibial prosthesis, (d) FGM-III tibial prosthesis

### 2.3 假体系统界面应力

为了更好地观察胫骨假体和胫骨松质骨上的应力变化, 对于不同的 FGM 假体, 通过在假体和松质骨接触面的 4 条路径[见图 3(a)]从有限元模型中提取应力。

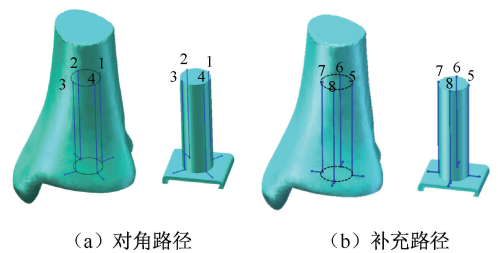


图 3 胫骨松质骨和胫骨假体应力观察路径  
Fig. 3 Tibial cancellous bone and tibial prosthesis stress observation path (a) Diagonal path, (b) Supplementary path

FGM 轴向胫骨假体和径向胫骨假体植入后, 由在站立位工况下胫骨假体与胫骨松质骨沿不同路径上 von Mises 应力曲线可见, 主要应力都集中在沿路径 40 mm 附近胫骨远端与胫骨假体平台接

触处。相比钛合金材料的胫骨假体, FGM 胫骨假体沿假体每条路径 von Mises 应力均有明显降低, 其中 FGM-III 胫骨假体沿假体各条路径上 von Mises 应力最小。在胫骨平台应力集中处, 径向胫骨假体比轴向应力降低更为明显, 可以有效减小假体上的应力集中现象, 使假体上的应力分布更加均匀 [见图 4(a)]。

在沿 4 条路径 40 mm 处主要受载的胫骨平台附近, 相比使用钛合金材料的胫骨假体, 使用 FGM 胫骨假体其松质骨上 von Mises 应力均有明显提升, 且使用 FGM-III 胫骨假体其松质骨上 von Mises 应力提升最为显著 [见图 4(b)]。本文认为, 设计的 FGM 胫骨假体均能有效增加胫骨远端平台松质骨上的应力, 从而减轻松质骨上的应力遮挡。

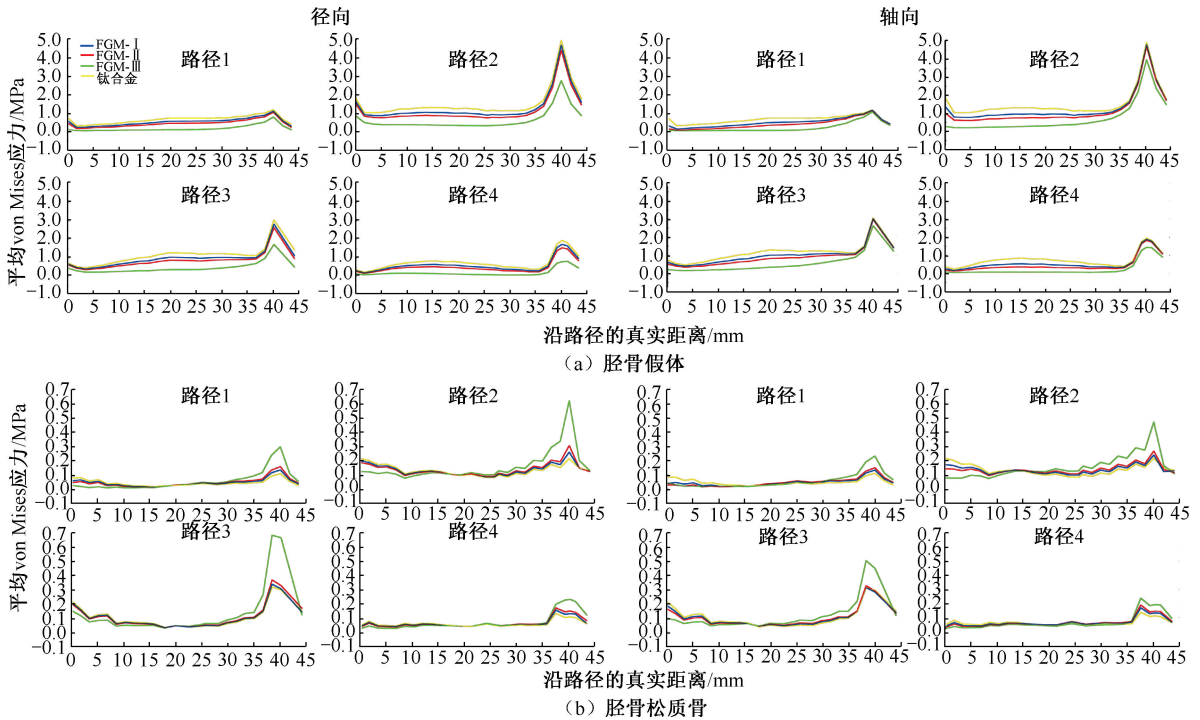


图 4 站立工况下各组全踝关节置换模型不同部位沿路径 1~4 的应力曲线

Fig. 4 Stress curves of different positions along the paths 1~4 of TAK models in standing position (a) Tibial prosthesis, (b) Tibial cancellous bone

对各组全踝关节置换模型胫骨松质骨沿路径的应力进行进一步分析。结果显示, 相比使用钛合金材料的假体, FGM-I 径向假体沿 4 条路径的平均应力整体上降低了 14.0%~19.1%, 轴向假体降低了 13.9%~24.7%; FGM-II 径向假体降低了 23.8%~31.9%, 轴向假体降低了 23.2%~38.2%; FGM-III 径向假体降低了 58.5%~70.9%, 轴向假体降低了 52.3%~64.9% (见表 3)。本文认为, 使用 FGM-III 的假体总体效果优于使用 FGM-I 和 FGM-II 的两种假体, 且使用 FGM-III 沿径向分布的效果最好。

相比使用钛合金材料的假体, 使用 FGM-I 径

向假体其胫骨松质骨沿 4 条路径的平均应力整体上提高了 0%~4.5%, 使用 FGM-II 径向假体提高了 2.7%~9.1%, 使用 FGM-III 径向假体提高了 17.6%~27.7%, 使用 FGM-III 轴向假体提高了 0%~17.0%。而使用 FGM-I、FGM-II 轴向假体其胫骨松质骨沿路径 1、3 上的平均应力略微有所降低, 沿路径 2、4 的平均应力略微有所提升 (见表 3)。本文认为, 设计的 3 种 FGM 径向胫骨假体和 FGM-III 轴向胫骨假体均能有效增加胫骨远端松质骨上的应力, 从而减轻松质骨上的应力遮挡。其中, FGM-III 径向胫骨假体最有效改善了松质骨上的应力水平, 效果最优。

表 3 站立位工况下各组全踝关节置换模型不同部位沿路径 1~4 平均应力

Tab. 3 Average stress of different positions along the paths 1-4 of TAK models in standing position

单位: kPa

组别	胫骨假体				胫骨松质骨			
	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4
FGM-I								
径向	537	1 326	953	629	48	138	110	69
轴向	500	1 310	969	600	45	136	107	68
FGM-II								
径向	452	1 175	842	532	50	140	113	72
轴向	410	1 156	863	501	45	139	107	70
FGM-III								
径向	193	634	467	223	60	160	139	80
轴向	233	735	535	275	55	155	122	66
钛合金	664	1 541	1 125	765	47	136	110	66

### 3 讨论和结论

设计制造出与人体骨骼力学性质相匹配的假体是假体改进的主要目标之一,而传统以钛合金为代表的金属假体材料与骨骼力学特性差异过大,FGM 的出现则为实现这一改进目标提供了可能。基于此,本文设计了基于 3 种 FGM (FGM-I、FGM-II 和 FGM-III) 分别沿径向和轴向两种梯度变化的胫骨假体,并对站立位工况下正常和 FGM 假体的踝关节应力分布进行有限元模拟。结果表明,使用 FGM-III 的假体总体效果优于使用 FGM-I 和 FGM-II 的两种假体,且使用 FGM-III 沿径向分布的效果最好。羟基磷灰石的存在为 FGM-III 胫骨假体提供了更多

的优势,如良好的生物相容性、生物活性、无毒性 and 独特的骨诱导作用。该 FGM 胫骨假体通过提高与衬垫接触部分的刚度,而在假体柄远端与松质骨接触的部位降低弹性模量,以达到减小胫骨松质骨上的应力遮挡,进而降低无菌松动的概率,延长假体寿命的目的。

为验证上述结论的可靠性,又增加了路径 5~8 [见图 3(b)] 进行分析。结果表明,新选路径辅助验证了旧有路径所得结论。相比钛合金材料的胫骨假体,FGM 胫骨假体沿假体每条路径的 von Mises 应力均有明显降低。其中,FGM-III 的假体总体效果优于使用 FGM-I 和 FGM-II 的两种假体,且 FGM-III 径向假体比轴向假体表现更为优异(见表 4)。

表 4 站立位工况下各组全踝关节置换模型不同部位沿路径 5~8 平均应力

Tab. 4 Average stress of different positions along the paths 5-8 of TAK models in standing position

单位: kPa

组别	胫骨假体				胫骨松质骨			
	路径 5	路径 6	路径 7	路径 8	路径 5	路径 6	路径 7	路径 8
FGM-I								
径向	687	630	1 476	452	80	76	159	36
轴向	638	660	1 495	450	79	70	159	35
FGM-II								
径向	572	556	1 300	403	81	74	163	39
轴向	503	607	1 336	475	80	69	162	39
FGM-III								
径向	220	319	674	247	87	71	193	59
轴向	210	466	859	358	76	70	185	59
钛合金	864	750	1 736	536	77	79	157	34

除了在路径 6 略微有所减少外,设计的 3 种 FGM 径向胫骨假体和 FGM-III 轴向胫骨假体均能有效增加胫骨远端松质骨上的应力,从而减轻松质骨上的应力遮挡。其中,FGM-III 径向胫骨假体最有效

改善了松质骨上的应力水平,效果最优(见表 4)。

综上所述,对于假体,使用 3 种 FGM 材料均可有效减小其应力集中。其中,FGM-III 胫骨假体总体的效果优于 FGM-I 和 FGM-II 两种假体,且相对轴

向分布而言,FGM沿径向分布可以有效降低假体的最大 von Mises 应力。设计的3种FGM径向胫骨假体和FGM-Ⅲ轴向胫骨假体均能有效增加胫骨远端松质骨上的应力,从而减轻松质骨上的应力遮挡。其中,FGM-Ⅲ径向骨假体最为有效改善了松质骨上的应力水平。以上结论表明,FGM-Ⅲ径向踝关节假体可以有效降低假体上的应力集中现象并减小应力遮挡效应,以此达到延长假体寿命的目的,具有潜在的应用前景。

基于目前的研究进展,还有许多工作可以展开:①本仿真的工况较为简单,使用的样本模型较为单一,后期可以考虑增大样本量,进一步探究不同年龄段、不同体型及多种复杂步态下FGM胫骨假体对胫骨远端松质骨的应力响应;②在对假体进行赋值时,本文使用的体积分数梯度指数 $k=1$ ,表示胫骨假体的材料组分呈线性变化,后续研究可以考虑选取不同的 $k$ 值,进一步探索不同体积分数梯度指数对假体应力的影响;③FGM踝关节假体并未涉及孔隙率的变化,后续研究同样可以进一步探索不同孔隙率对假体应力的影响。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**马杰负责论文撰写及有限元分析;李永胜负责指导模型建立和论文审校;陈静负责课题设计和论文审校;武晓刚、林建英、文云鹏负责论文审校。

## 参考文献:

- [ 1 ] YE D, SUN X, ZHANG C, et al. *In vivo* foot and ankle kinematics during activities measured by using a dual fluoroscopic imaging system: A narrative review [ J ]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021, 19(9): 693806.
- [ 2 ] SALTZMAN CL, SALAMON ML, BLANCHARD GM, et al. Epidemiology of ankle arthritis: Report of a consecutive series of 639 patients from a tertiary orthopaedic center [ J ]. *Iowa Orthop J*, 2005(25): 44-46.
- [ 3 ] ZWIPP H, RAMMELT S, ENDRES T, et al. High union rates and function scores at midterm followup with ankle arthrodesis using a four screw technique [ J ]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468(4): 958-968.
- [ 4 ] 丁松,周耀君,陈明亮,等. 踝关节融合术的研究进展[ J ]. *国际骨科学杂志*, 2020, 41(1): 32-36.
- [ 5 ] MAFFULLI N, LONGO UG, LOCHER J, et al. Outcome of ankle arthrodesis and ankle prosthesis: A review of the current status [ J ]. *Br Med Bull*, 2017, 124(1): 91-112.
- [ 6 ] HENRY JK, RIDER C, CODY E, et al. Evaluating and managing the painful total ankle replacement [ J ]. *Foot Ankle Int*, 2021, 42(10): 1347-1361.
- [ 7 ] STAVRAKIS AI, SOOHOO NF. Trends in complication rates following ankle arthrodesis and total ankle replacement [ J ]. *J Bone Joint Surg Am*, 2016, 98(17): 1453-1458.
- [ 8 ] DELEU PA, BESSE JL, NAAIM A, et al. Change in gait biomechanics after total ankle replacement and ankle arthrodesis: A systematic review and meta-analysis [ J ]. *Clin Biomech*, 2020(73): 213-225.
- [ 9 ] LAW TY, SABEH KG, ROSAS S, et al. Trends in total ankle arthroplasty and revisions in the Medicare database [ J ]. *Ann Transl Med*, 2018, 6(7): 112.
- [ 10 ] PANGRAZZI GJ, BAKER EA, SHAHEEN PJ, et al. Single-surgeon experience and complications of a fixed-bearing total ankle arthroplasty [ J ]. *Foot Ankle Int*, 2018, 39(1): 46-58.
- [ 11 ] ONGGO JR, NAMBIAR M, PHAN K, et al. Outcome after total ankle arthroplasty with a minimum of five years follow-up: A systematic review and meta-analysis [ J ]. *Foot Ankle Surg*, 2020, 26(5): 556-563.
- [ 12 ] KERKHOFF YRA, KOSSE NM, METSAARS WP, et al. Long-term functional and radiographic outcome of a mobile bearing ankle prosthesis [ J ]. *Foot Ankle Int*, 2016, 37(12): 1292-1302.
- [ 13 ] BIANCHI A, MARTINELLI N, CABONI E, et al. Long-term follow-up of Bologna-Oxford (BOX) total ankle arthroplasty [ J ]. *Int Orthop*, 2021, 45(5): 1223-1231.
- [ 14 ] OULDYEROU A, MEHBOOB H, MERDJI A, et al. Biomechanical analysis of printable functionally graded material (FGM) dental implants for different bone densities [ J ]. *Comput Biol Med*, 2022(150): 106-111.
- [ 15 ] DE RUITER L, RANKIN K, BROWNE M, et al. Decreased stress shielding with a PEEK femoral total knee prosthesis measured in validated computational models [ J ]. *J Biomech*, 2021, 30(118): 110270.
- [ 16 ] VIDAL L, KAMPEITNER C, BRENNAN MÁ, et al. Reconstruction of large skeletal defects: current clinical therapeutic strategies and future directions using 3D printing [ J ]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2020, 12(8): 61.
- [ 17 ] NAJIBI A, MOKHTARI T. Functionally graded materials for knee and hip arthroplasty: An update on design, optimization, and manufacturing [ J ]. *Compos Struct*, 2023(322): 117350.
- [ 18 ] LIU X, YUE Y, WU X, et al. Analysis of transient

- response of the human foot based on the finite element method [J]. *Technol Health Care*, 2022, 30(1): 79-92.
- [19] 梁珊珊, 程吉, 杨靖, 等. 踝关节生物力学及有限元模型建立技术的研究进展[J]. *当代体育*, 2023(15): 113-116.
- [20] PHAN PK, VO ATN, BAKHTIARYDAVIJANI A, *et al.* *In silico* finite element analysis of the foot ankle complex biomechanics: A literature review [J]. *J Biomech Eng*, 2021, 143(9): 090802.
- [21] 金乾坤, 何盛为, 何飞熊, 等. 足踝部三维有限元仿真模型的构建及验证 [J]. *中国数字医学*, 2016, 11(4): 83-86.
- [22] GUIOTTO A, SAWACHA Z, GUARNERI G, *et al.* 3D finite element model of the diabetic neuropathic foot: A gait analysis driven approach [J]. *J Biomech*, 2014, 47(12): 3064-3071.
- [23] HEDIA HS, ALDOUSARI SM, FOU DA N. Material optimization of a cemented tibia tray using functionally graded material [J]. *Mater Test*, 2022, 58(3): 260-268.
- [24] 贾巍, 张满栋, 陈维毅, 等. 股骨假体材料对人工膝关节置换性能的影响[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(10): 1477-1481.
- [25] ENAB TA. A comparative study of the performance of metallic and FGM tibia tray components in total knee replacement joints [J]. *Comp Mater Sci*, 2012, 53(1): 94-100.
- [26] ANDERSON DD, GOLDSWORTHY JK, LI W, *et al.* Physical validation of a patient-specific contact finite element model of the ankle [J]. *J Biomech*, 2007, 40(8): 1662-1669.