

文章编号: 1004-7220(2024)01-0098-08

用于开放式胫骨高位截骨术解剖型固定板的生物力学研究

张嘉宁¹, 袁霄¹, 张静¹, 高永昌¹, 张志峰², 陈瑱贤¹

(1. 长安大学 工程机械学院, 西安 710064; 2. 内蒙古医科大学第二附属医院 关节外科, 呼和浩特 010110)

摘要:目的 针对个体化开放式胫骨高位截骨术(open wedge high tibial osteotomy, OWHTO), 设计一种新型内固定板, 并研究几何参数和材料选择对其生物力学固定性能的影响。方法 通过个体化 OWHTO 解剖型固定板设计建模, 采用有限元分析方法, 参数化研究固定板厚度、宽度和长度设计参数以及不锈钢、钛合金、镁合金和聚醚醚酮(PEEK)4种不同材料选取对 OWHTO 固定系统生物力学的影响, 对比了解剖型固定板与 TomoFix 固定板的生物力学差异。结果 相比于固定板的长度与宽度, 厚度对截骨间隙微位移的影响最大。与不锈钢和 PEEK 材料相比, 钛合金或镁合金固定板更有利于同时获得合理的稳定性和力学传递。与 TomoFix 固定板相比, 解剖型固定板最大 von Mises 应力降低了 13.5%, 螺钉和胫骨最大 von Mises 应力分别增大了 9.8% 与 18.4%, 最大截骨间隙 cc 处微位移增大了 49.3%。结论 解剖型固定板在保证稳定性的前提下对减轻应力屏蔽效应以及提高生物力学性能有更积极的影响。研究结果为 OWHTO 解剖型固定板的开发提供参考。

关键词: 开放式胫骨高位截骨术; 解剖型固定板; 有限元分析; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.01.014

Biomechanical Study of Anatomical Fixation Plate for Open Wedge High Tibial Osteotomy

ZHANG Jianing¹, YUAN Xiao¹, ZHANG Jing¹, GAO Yongchang¹, ZHANG Zhifeng², CHEN Zhenxian¹

(1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Department of Joint Surgery, the Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, China)

Abstract: Objective For patient-specific open-wedge high tibial osteotomy (OWHTO), a novel anatomical fixation plate was designed, and the effects of geometric parameters and material selection on biomechanical fixation were studied. **Methods** A patient-specific OWHTO anatomical fixation plate was designed and constructed, and the effects of design parameters (thickness, width, and length of the fixation plate) and four different materials (stainless steel, titanium alloy, magnesium alloy, and PEEK) on the biomechanics of the OWHTO fixation system were studied using finite element analysis. The biomechanical differences between the anatomical fixation plate and TomoFix fixation plate were also compared. **Results** The thickness had a greater effect on the micromotion of the osteotomy space than the length and width of the fixation plate did. Titanium alloy

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(11902048, 1220021015), 陕西省自然科学基金项目(2022JQ-529, 2023-JC-YB-402), 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102252106)

通信作者: 陈瑱贤, 高级工程师, 硕士生导师, E-mail: zhenxian_chen@yeah.net

or magnesium alloy fixation plates were more conducive than stainless steel and PEEK materials in obtaining reasonable stability and mechanical transfer simultaneously. Compared with that of the TomoFix plate, the maximum von Mises stress of the anatomical fixation plate was reduced by 13.5%; the maximum von Mises stress of the screws and tibia was increased by 9.8% and 18.4%, respectively; and the micromotion at the maximum osteotomy space cc was increased by 49.3%. **Conclusions** Anatomical fixation plates have a positive effect on reducing the stress-shielding effect and improving biomechanical properties under the premise of ensuring stability. This study provides a reference for the development of OWHTO anatomical fixation plates.

Key words: open wedge tibial high osteotomy; anatomical fixation plates; finite element analysis; biomechanics

胫骨高位截骨术 (high tibial osteotomy, HTO) 是治疗膝关节骨关节炎的有效手术方式之一,它通过重建下肢力线将受力转移至可行的外侧间室,从而降低已病变的内侧间室压力,减轻膝关节疼痛与不适^[1-2]。HTO 分为内侧开放式胫骨高位截骨术 (open wedge high tibial osteotomy, OWHTO) 与外侧闭合式胫骨高位截骨术 (closed wedge high tibial osteotomy, CWHTO)。研究表明,CWHTO 通过截骨端加压闭合,需要进行腓骨截骨,会造成下肢缩短,矫正度数有限,易造成胫腓关节不稳,损伤腓总神经,甚至可能出现筋膜室综合征^[3]。因此,OWHTO 则成为临床应用最广泛、研究最多的一种矫形方式^[4-5]。

OWHTO 的核心在于使用合理的固定系统来保持正确的下肢力线矫正角度,维持胫骨近端截骨固定的稳定性。固定板的结构设计对术后截骨矫正的维持和截骨楔口部位的愈合恢复至关重要^[6]。目前,Puddu 固定板和 Aescula 固定板尺寸较小、稳定性差,易造成骨延迟愈合和不愈合,可能导致胫骨后倾角增大,患者下地负重时间延长^[7-9];而经典的 TomoFix 固定板虽然能维持胫骨近端稳定,但其尺寸较大容易引起局部刺激,且其固定系统过刚度易导致骨愈合延迟^[10]。OWHTO 术后胫骨骨折、固定板断裂、截骨切口难以愈合等并发症一直困扰着患者和医生,严重阻碍了 OWHTO 技术的发展^[11]。固定系统设计不合理依然是 OWHTO 临床失效问题的重要原因。

术后影像学结果显示,非解剖型固定板和胫骨内侧轮廓之间存在一定间隙,这可能是患者抱怨植入物刺激的一个重要原因^[12]。解剖型固定板在解剖学上为预成型,以适合胫骨前内侧近端。Weng 等^[13]研究发现,解剖型固定板增大了与胫骨远端接触的面积。Han 等^[14]研究认为,新型解剖 OhtoFix 固定板为

OWHTO 提供了足够的初期稳定性,但未显示出其在平衡内侧植入物与外侧铰链区域应力分布的优势。Hernigou 等^[15]研究证明,新型解剖 Limmed 固定板可以缩短骨愈合时间、加快骨生长,有令人满意的稳定性和立即完全负重的骨愈合效果。但是,临床前研究解剖型固定板设计参数对 OWHTO 固定系统应力分布与骨愈合的影响,还鲜有报道。

本文提出一种新型解剖型固定板设计,并通过有限元方法评估其生物力学性能,参数化研究固定板厚度、宽度和长度设计参数以及材料对 OWHTO 固定系统生物力学的影响,对比解剖型固定板与 TomoFix 固定板的生物力学差异。

1 材料与方法

1.1 固定板设计

招募 1 名膝关节健康的男性志愿者 (年龄 26 岁,身高 187 cm,体质量 85 kg),采集该志愿者 CT 影像学数据。将 CT 数据导入 Mimics 17.0 (Materialise 公司,比利时) 建立胫骨三维几何模型。通过 Geomagic Studio 13.0 (Geomagic 公司,美国) 对三维骨骼模型进行封装和曲面化后处理。将处理完成后的胫骨三维模型导入 SolidWorks 2018 (Dassault Systemes 公司,法国) 中在胫骨内侧创建 1 个开口楔形模拟 OWHTO 截骨^[16]。

针对上述建立的胫骨 OWHTO 模型,本研究设计了一种“Γ”形解剖型固定板 (见图 1)。在尺寸参数上,由于 TomoFix 固定板太长 (112/115 mm)^[17] 容易导致远端刺激,Puddu 固定板太短 (46/66 mm) 容易导致矫正缺失,故新型解剖型固定板的长度选择 75 mm,期望在保持矫正精度的前提下能减少刺激与不适。最大宽度选择 40 mm,以确保在胫骨平台下方放置足够数量的螺钉以维持稳固。过大的

厚度会增加植入物刚度、减少骨应变和截骨间隙微位移,故厚度选择 3 mm^[17-18]。对于单板固定而言,内前侧的安装位置更有利于稳定内侧的截骨间隙^[19-20],故固定板采用 Γ 形状结构设计。螺钉直径为 4.5 mm,螺钉长度为 36 mm。在新型解剖型固定板的近端,从固定板的中心区域插入并指向外侧铰链区域均匀分布 3 个螺钉孔(S1、S2、S3),期望平衡 OWHTO 系统整体的应力分布以缓解外侧铰链区域的应力集中,从而降低外侧铰链区域骨折的风险。在新型解剖型固定板的远端,沿轴向均匀分布 3 颗螺钉孔(S4、S5、S6)。

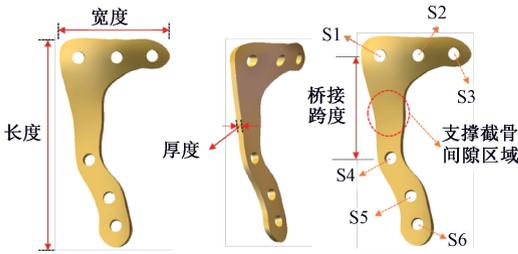


图 1 OWHTO 新型解剖型固定板

Fig. 1 Novel anatomical fixation plate for OWHTO

为了对比解剖型固定板和经典 TomoFix 固定板的生物力学性能差异,在 SolidWorks 中建立 TomoFix 固定板三维模型,长、宽、厚分别为 112、38、3 mm,近端部分弧度半径为 30 mm。

1.2 有限元模型

将建立的新型解剖型固定板、TomoFix 固定板和截骨矫正后胫骨三维模型导入 HyperMesh 2020 (Altair 公司,美国)中进行网格划分。新型解剖型固定板和 TomoFix 固定板的单元平均尺寸为 1 mm,胫骨的单元平均尺寸设为 2 mm,单元类型均为 C3D4。将胫骨网格模型 INP 文件导入 Mimics 17.0 中,根据 CT 数据每一点灰度值与骨密度的关系,以及骨密度与弹性模量之间的线性关系^[21]:

$$\rho = 0.0405 + HU \times 10^{-4} \quad (1)$$

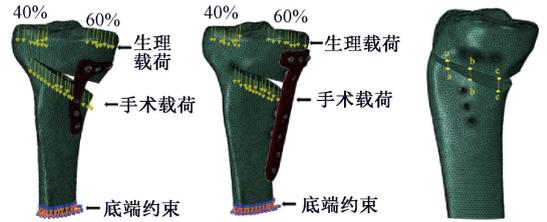
$$E = \begin{cases} 3.60\rho - 0.14, & 0 < \rho \leq 0.1 \\ 18.49\rho^{1.93}, & 0.1 < \rho \leq 0.37 \\ 8.87\rho - 0.57, & 0.37 < \rho \leq 1.5 \\ 4.83\rho^{2.39}, & \rho > 1.5 \end{cases} \quad (2)$$

对每个网格单元进行骨骼材料属性赋值。将赋值后的胫骨模型和网格划分后的固定板模型导

入 ABAQUS 2020 (SIMULIA 公司,法国)中建立有限元模型。

解剖型固定板和 TomoFix 固定板均采用钛合金材料 (Ti-6Al-4V),弹性模量为 110 GPa,泊松比为 0.3。螺钉材料属性与固定板材料属性一致^[22]。胫骨-固定板界面定义为面面接触,采用罚接触属性,摩擦因数为 0.3。胫骨-螺钉^[17]、固定板螺钉孔-螺钉界面采用绑定约束^[22]。

在胫骨平台上施加 1.4 kN 生理负荷以模拟单腿站立时胫骨平台受力。在胫骨平台内、外侧室分别施加 60% 和 40% 的载荷。在胫骨截骨开口的皮质骨上施加 200 N 术中介入的手术载荷^[22]。胫骨远端的 6 个自由度全部固定^[23-24]。为了评估截骨间隙开口的微位移变化,在边缘 cc、bb 和 aa 处取 3 对点的相对位移来评估^[22] (见图 2)。



(a) 解剖型固定板固定 (b) TomoFix 板固定 (c) 位移分析标记点

图 2 OWHTO 胫骨近端有限元模型

Fig. 2 Finite element models of proximal tibia with OWHTO (a) Anatomical fixation plate fixation, (b) TomoFix fixation plate fixation, (c) Markers at the osteotomy for displacement analysis

1.3 参数化研究

为了进一步完善初始设计的新颖解剖型固定板,根据固定板长度、宽度和厚度 3 个设计变量,通过 Minitab 2017 (Minitab 公司,美国)中 DOE 命令,根据正交性计算变量对结果的影响,从所有参数中确定重要的因素,得到 L9 正交阵列^[16] (见表 1)。在长度、宽度与厚度上,与初始值的偏差分别为 ± 15 、 -5 和 0.75 mm。基于此,建立 9 组不同的 OWHTO 三维模型。

为研究不锈钢、钛合金、镁合金和聚醚醚酮 (PEEK) 4 种不同材料对 OWHTO 固定板的生物力学影响,又建立了 4 个对应的有限元模型。设置不锈钢、钛合金、镁合金和 PEEK 的弹性模量分别为 210、110、52、30 GPa,泊松比均为 0.3。

表1 L9设计阵列

Tab.1 L9 design array

组号	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm
1	60	30	1.50
2	60	45	2.25
3	60	40	3.00
4	75	30	1.50
5	75	45	2.25
6	75	40	3.00
7	90	30	1.50
8	90	45	2.25
9	90	40	3.00

通过上述有限元仿真研究,模型预测了不同情况下固定板、螺钉和胫骨的 von Mises 应力以及胫骨楔口的相对微位移。

2 结果

2.1 设计参数对固定系统生物力学的影响

9种设计参数下有限元模型预测的固定板、螺钉和胫骨最大 von Mises 应力以及胫骨楔口的相对微位移见表2。结果显示,2号固定板设计的固定板、胫骨外侧铰链区域最大 von Mises 应力都小于其余固定板设计,截骨间隙 cc、bb、aa 处微位移均小于其余多种固定板设计。由此可见,2号固定板设计表现出优于其余固定系统的生物力学性能。

表2 固定板9种设计参数下有限元模型预测

Tab.2 Predictions of finite element models for fixation plates with 9 design parameters

分组	最大 von Mises 应力/MPa			微位移/ μm		
	固定板	胫骨外侧铰链区域	螺钉	aa 处	bb 处	cc 处
1	357.3	112.6	368.4	96.9	-236.6	-480.7
2	209.9	51.5	170.1	52.5	-138.9	-243.5
3	348.0	80.3	460.7	91.9	-195.1	-411.1
4	296.0	93.3	206.8	70.5	-213.5	-439.2
5	300.7	128.0	290.4	86.4	-216.5	-429.9
6	358.6	128.7	307.0	91.0	-288.3	-488.7
7	259.4	84.0	214.9	68.2	-255.4	-435.5
8	391.9	91.5	243.9	72.2	-285.2	-510.3
9	284.1	106.1	172.4	66.5	-217.5	-392.1

在固定板尺寸参数上,厚度参数比长度与宽度参数分析的方差至少增大了106.0%与121.9%,极差至少增大了11.9%与61.4%(见表3)。

2.2 材料选择对固定系统生物力学的影响

结果显示,不锈钢解剖型固定板、螺钉、胫骨

表3 不同固定板材料下长宽厚对平均微位移的影响

Tab.3 Influence of length, width and thickness of different fixation plate materials on average micro-displacement

材料	参数	平方和	方差	极差
不锈钢	长度	159.6	79.8	28.3
	宽度	171.6	85.8	29.0
	厚度	380.7	190.4	46.8
钛合金	长度	592.5	296.3	51.3
	宽度	218.5	109.3	34.9
	厚度	581.3	290.7	57.4
镁合金	长度	845.7	422.9	55.1
	宽度	493.9	247.0	51.4
	厚度	2 109.6	1 054.8	110.9
PEEK	长度	5 209.8	2 604.9	136.4
	宽度	747.2	373.6	29.9
	厚度	9 595.9	4 798.0	238.3

最大 von Mises 应力分别为 209.9、160.5、39.1 MPa, 外侧铰链区域应力为 37.3 MPa; 截骨间隙 cc、bb、aa 处微位移分别为 -135.8、-63.5、51.3 μm 。钛合金解剖型固定板、螺钉、胫骨最大 von Mises 应力分别为 154.8、162.3、39.9 MPa, 外侧铰链区域应力为 39.2 MPa; 截骨间隙 cc、bb、aa 处微位移分别为 -157.2、-83.4、52.5 μm 。镁合金解剖型固定板、螺钉、胫骨最大 von Mises 应力分别为 118.7、155.5、40.8 MPa, 外侧铰链区域应力为 40.7 MPa; 截骨间隙 cc、bb、aa 处微位移分别为 -182.6、-98.7、51.6 μm 。PEEK 解剖型固定板、螺钉、胫骨最大 von Mises 应力分别为 84.5、170.1、51.5 MPa, 外侧铰链区域应力为 38.4 MPa; 截骨间隙 cc、bb、aa 处微位移分别为 -243.5、-138.9、31.6 μm (见图3、4)。结果表明,随着固定板材料弹性模量增大,固定板最大 von Mises 应力显著增大,胫骨和外侧铰链区域最大 von Mises 应力减小,胫骨总位移减小,截骨间隙微位移减小。

2.3 新型解剖型固定板与 TomoFix 固定板对比

结果显示,新型解剖型固定板最大 von Mises 应力为 154.8 MPa,应力集中在支撑截骨间隙的区域附近;螺钉最大 von Mises 应力为 162.3 MPa,应力集中在 S4 螺钉;胫骨最大 von Mises 应力为 39.9 MPa,应力集中在切口外侧铰链区域的楔形尖角处;截骨间隙 cc、bb、aa 处微位移分别为 -157.2、-83.4、52.5 μm 。TomoFix 固定板最大 von Mises 应力为 158.6 MPa,应力集中在固定板的内侧拐角和截骨间隙上下方最近的螺钉孔周围;螺钉最大 von Mises 应力为 159.9 MPa,应力集中在截骨间隙下

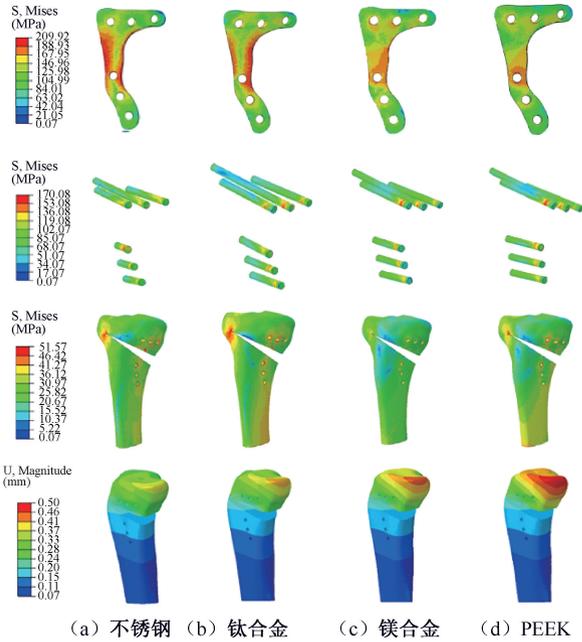


图3 不同材料情况下2号固定板应力与胫骨总位移分布

Fig. 3 Stresses and total tibial displacement distributions for No. 2 fixation plate under different materials cases (a) Stainless steel, (b) Titanium alloy, (c) Magnesium alloy, (d) PEEK

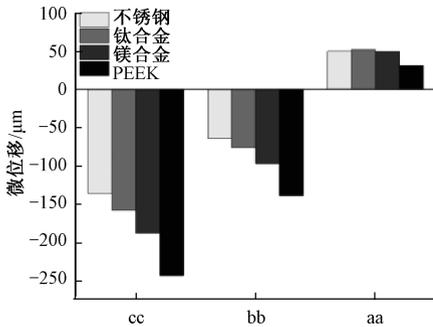
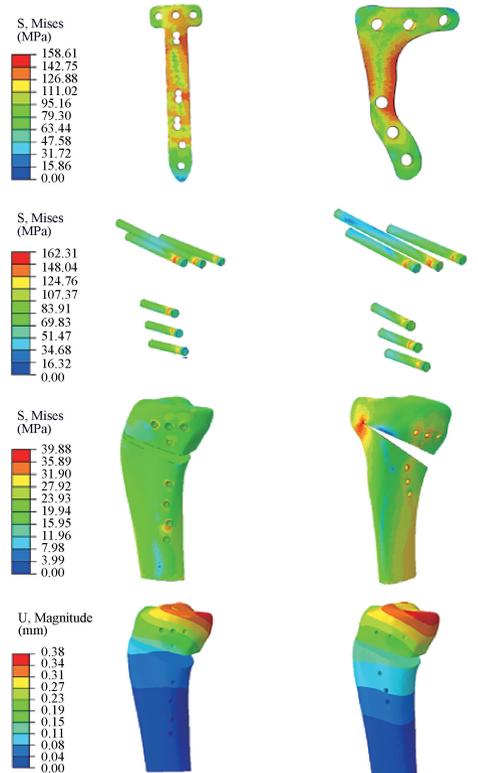


图4 不同材料情况下2号固定板截骨间隙cc、bb和aa微位移
Fig. 4 Micro-displacements of the tibial wedge gap at cc, bb and aa for No. 2 fixation plate under different materials cases

方最近的螺钉;胫骨最大 von Mises 应力为 33.7 MPa, 应力集中在外侧铰链区域的前侧楔形尖角处;截骨间隙 cc、bb、aa 处微位移分别为 -98.4、-21.4、38.7 μm (见图 5、6)。与 TomoFix 固定板相比,新型解剖型固定板最大 von Mises 应力下降了 2.4%, 胫骨和螺钉最大 von Mises 应力分别增大了 18.4%、1.5%, 截骨间隙 cc、bb、aa 处微位移分别增加了 35.7%、290.0%、59.7%。



(a) TomoFix 固定板 (b) 新型解剖固定板

图5 新型解剖型固定板与 TomoFix 固定板固定下模型各部分应力及胫骨总位移分布

Fig. 5 Distributions of stresses in each part and total tibial displacement distribution for novel anatomical fixation system and TomoFix fixation system (a) TomoFix fixed plate (b) New anatomical fixation plate

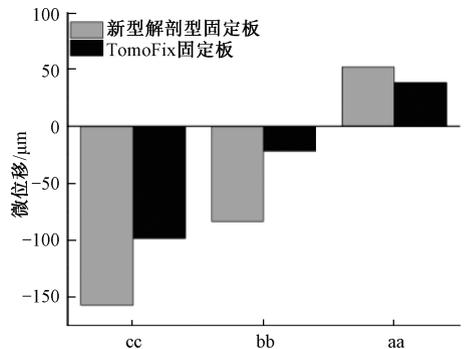


图6 新型解剖型固定板与 TomoFix 固定板固定下载骨间隙 cc、bb 和 aa 微位移比较

Fig. 6 Comparison of micro-displacements of the tibial wedge gap at cc, bb and aa between new anatomical fixation plate and TomoFix fixation plate

3 讨论

由于载荷从胫骨平台向胫骨远端传递时,一方面通过固定系统传递,另一方面通过胫骨外侧铰链区域传递,更大弹性模量的固定板材料为内侧植入物带来更高的刚度,使得更多的载荷通过固定系统传递,从而导致固定板的高应力状态。如果胫骨和外侧铰链区域长期处于较低的应力水平,可能导致应力屏蔽效应的加重^[25]。不锈钢固定板最大 von Mises 应力约为胫骨最大 von Mises 应力的 3.5 倍,容易引发应力屏蔽效应,导致外侧铰链区域骨折致使骨延迟愈合。为满足截骨间隙刺激愈合需要,固定板设计的截骨间隙微位移应处于 0.1~0.2 mm 之间^[16,26]。然而,PEEK 固定板最大截骨间隙 cc 处微位移均大于 0.2 mm。钛合金或镁合金材料的固定板可平衡内侧植入物与外侧铰链区域的应力分布,在满足稳定性的前提下能有效刺激骨愈合。

本文发现,厚度对 OWHTO 的生物力学影响远大于长度与宽度的影响,特别厚度对微位移的影响最大。该结果与 Roderer 等^[27]提出的固定板生物力学效果与固定板厚度设计具有重要联系的结论相吻合,OWHTO 术后胫骨平台上的大部分载荷都由固定板和螺钉来承担,必须保证足够的固定板厚度以避免发生疲劳断裂。但过大的厚度会增大内侧植入物的刚度,减少固定板周围的微位移与组织应变。因此,在研究固定系统设计时,应着重考虑稳定性与骨愈合的平衡。

与 TomoFix 固定板相比,新型解剖型固定板与螺钉最大 von Mises 应力都未超过钛合金的屈服强度(795 MPa)^[28],胫骨与外侧铰链区域最大 von Mises 应力增大了 18.4%,截骨间隙 cc、bb、aa 处微位移分别增加了 35.7%、290.0%、59.7%。在满足安全性的前提下,新型解剖型固定板改善了固定系统过刚度的问题,同时最大截骨间隙微位移仍未超过骨愈合允许移动的最大值(0.2 mm)^[29]。较小的尺寸设计、前内侧的固定设计可能是解剖固定板获得较大微位移的原因。较大的微位移能够带来足够的刺激以加快骨生长。因此,在保证稳定性的前提下,新型解剖型固定板在术后骨愈合方面展示出更积极的效果,但这需要进一步的临床验证。

现有固定板一般在胫骨远端采用 4 颗^[16,30]或 3 颗^[31-32]螺钉以固定截骨部位,由于胫骨受力主要由截骨间隙下方的第一远端螺钉传递,远端 4 或 3 颗螺钉对固定板的初始稳定性影响较小。如果螺钉数过多,容易导致固定系统过刚度,而螺钉数过少不能满足固定系统稳定性要求。因此,设计时应合理选择螺钉数。此外,与直径较小的螺钉相比,直径较大的螺钉可以减小螺钉与骨接触界面的应力,降低螺钉断裂和侧铰链骨折的风险,增强固定稳定性^[33]。

本研究的局限性如下:① 未考虑解剖型固定板设计中桥接跨度对 HTO 生物力学的影响。MacLeod 等^[28]发现,与短桥接跨度的固定板相比,长桥接跨度的固定板不一定会增加固定板应力,而增大桥接跨度会对愈伤组织的形成会产生较好的刺激;② 解剖型固定板设计中没有考虑螺钉孔数量以及螺钉孔的位置对 HTO 生物力学的影响;③ 只模拟了胫骨站立时的承载情况,后续研究应该考虑步态加载条件;④ 由于本文目标是设计方案的探索研究,胫骨建模采用了正常人的影像学数据,但在针对具体患者的术后效果评估时,应采用更多真实病例进行研究,以保证结果接近实际情况;⑤ 由于未查阅到针对中国人骨骼的密度-弹性模量关系,采用文献报道的方法对骨骼进行赋值。在后续解剖型固定板优化设计研究中,应考虑改善上述局限性,获得更合理的结果。

4 结论

与长度、宽度相比,OWHTO 解剖型固定板厚度设计参数对固定系统的生物力学影响较大,特别是对截骨间隙微位移的影响最大。相比不锈钢和 PEEK 材料,选择钛合金或镁合金制造固定板可以同时满足对稳定性和骨愈合的设计需求。与 TomoFix 固定板相比,新型解剖型固定板降低了固定板和胫骨上的应力,平衡了内侧植入物和外侧铰链区域的应力分布,在保证稳定性的前提下对改善应力屏蔽效应以及提高生物力学性能有更积极的影响。本研究结果为解剖型固定板设计开发提供了重要的理论依据。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:张嘉宁负责论文撰写;张嘉宁、袁霄负责模型建立和计算分析;张静、高永昌、张志峰负责论文审阅和修改;陈真贤负责研究设计及论文指导。

参考文献:

- [1] PIPINO G, INDELLI PF, TIGANI D, *et al.* Opening-wedge high tibial osteotomy: A seven-to twelve-year study [J]. *Joints*, 2016, 4(1): 6-11.
- [2] 吕林蔚, 杨晨, 宋阳, 等. 膝关节置换术后长期胫骨近端力学性能的预测 [J]. *医用生物力学*, 2023, 38(3): 542-528. LV LW, YANG C, SONG Y, *et al.* Long-term mechanical property prediction of the proximal tibia after knee arthroplasty [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(3): 542-528.
- [3] RUPP MC, LINDNER F, WINKLER PW, *et al.* Clinical effect of isolated lateral closing wedge distal femoral osteotomy compared to medial opening wedge high tibial osteotomy for the correction of varus malalignment: A propensity score-matched analysis [J]. *Am J Sports Med*, 2023, 51(2): 437-445.
- [4] 周羿辰, 孙长英. 胫骨高位截骨术研究进展 [J]. *中华老年多器官疾病杂志*, 2019, 18(5): 394-397.
- [5] CHENG X, LIU F, XIONG F, *et al.* Radiographic changes and clinical outcomes after open and closed wedge high tibial osteotomy: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 179.
- [6] KANG KT, KOH YG, LEE JA, *et al.* The influence of the number of holes in the open wedge high tibial osteotomy on knee biomechanics using finite element analysis [J]. *Orthop Traumatol Sur*, 2021, 107(4): 102884.
- [7] HEE-SOO K, BYOUNG-JOO L, JOON-WOO K, *et al.* Biplanar open wedge high tibial osteotomy in the medial compartment osteoarthritis of the knee joint: Comparison between the aescula and tomofix plate [J]. *Clin Orthop Surg*, 2015, 7(2): 185-190.
- [8] ASADA S, AKAGI M, MORI S, *et al.* Increase in posterior tibial slope would result in correction loss in frontal plane after medial open wedge high tibial osteotomy [J]. *Knee Surg Sport Tra A*, 2012, 20(3): 571-578.
- [9] SCHRÖTER S, GONSER CE, KONSTANTINIDIS L, *et al.* High complication rate after biplanar open-wedge high tibial osteotomy stabilized with a new spacer plate (Position HTO plate) without bone substitute [J]. *Arthroscopy*, 2011, 27(5): 644-652.
- [10] YABUUCHI K, KONDO E, ONODERA J, *et al.* Clinical outcomes and complications during and after medial open-wedge high tibial osteotomy using a locking plate: A 3- to 7-year follow-up study [J]. *Orthop J Sport Med*, 2020, 8(6): 2325967120922535.
- [11] KUMAGAI K, FUGIMAKI H, YAMADA S, *et al.* Difference in the early postoperative change of the joint line convergence angle between opening wedge and closed wedge high tibial osteotomies [J]. *J Orthop Surg Res*, 2021, 16: 66.
- [12] JEONG SH, SAMUEL LT, ACUNA AJ, *et al.* Patient-specific high tibial osteotomy for varus malalignment: 3D-printed plating technique and review of the literature [J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2021, 32(5): 845-855.
- [13] WENG PW, LIAW CK, CHEN CH, *et al.* Concentrated stress effects of contoured and non-contoured high tibial osteotomy plates: A finite-element study [J]. *Clin Biomech*, 2020, 78: 105089.
- [14] HAN SB, BAE JH, LEE SJ, *et al.* Biomechanical properties of a new anatomical locking metal block plate for opening wedge high tibial osteotomy: Uniplane osteotomy [J]. *Knee Surg Relat Res*, 2014, 26(3): 155-161.
- [15] HERNIGOU P, QUEINNEC S, PICARD L, *et al.* Safety of a novel high tibial osteotomy locked plate fixation for immediate full weight-bearing: A case-control study [J]. *Int Orthop*, 2013, 37(12): 2377-2384.
- [16] KOH YG, LEE JA, LEE HY, *et al.* Design optimization of high tibial osteotomy plates using finite element analysis for improved biomechanical effect [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 219.
- [17] CHEN YN, CHANG CW, LI CT, *et al.* Biomechanical investigation of the type and configuration of screws used in high tibial osteotomy with titanium locking plate and screw fixation [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 35.
- [18] GOLOVAKHSMALL ACML, ORLJANSKI W, BENEDETTO KP, *et al.* Comparison of theoretical fixation stability of three devices employed in medial opening wedge high tibial osteotomy: A finite element analysis [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2014, 15: 230.
- [19] YOO OS, LEE YS, LEE MC, *et al.* Morphologic analysis of the proximal tibia after open wedge high tibial osteotomy for proper plate fitting [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2016, 17(1): 423.
- [20] LUO CA, HWA SY, LIN SC, *et al.* Placement-induced effects on high tibial osteotomized construct-biomechanical tests and finite-element analyses [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2015, 16: 235.
- [21] SOPHER RS, AMIS AA, CALDER JD, *et al.* Total ankle replacement design and positioning affect implant-bone micromotion and bone strains [J]. *Med Eng Phys*, 2017, 42: 80-90.
- [22] LUO CA, HUA SY, LIN SC, *et al.* Stress and stability

- comparison between different systems for high tibial osteotomies [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2013, 14: 110.
- [23] 于成双, 马卢斌, 王颖, 等. 不同填充块对内侧开放楔形胫骨高位截骨应力分布的影响 [J]. *医用生物力学*, 2023, 38(1): 84-89.
- YU CS, MA LB, WANG Y, *et al.* Stress distributions affected by different filling blocks in medial opening wedge high tibial osteotomy [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(1): 84-89.
- [24] 井野, 吕林蔚, 宫赫, 等. 全髋关节置换术对股骨近端骨重建的影响 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(1): 40-44.
- JING Y, LV LW, GONG H, *et al.* Effects of total hip arthroplasty on proximal femoral bone remodeling [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(1): 40-44.
- [25] JANG YW, LIM D, SEO H, *et al.* Role of an anatomically contoured plate and metal block for balanced stability between the implant and lateral hinge in open-wedge high-tibial osteotomy [J]. *Arch Orthop Traum Su*, 2018, 138(7): 911-920.
- [26] PILLIAR MLJ, MANIATOPOULOS C. Observations on the effect of movement on bone ingrowth into porous-surfaced implants [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1986, 208: 108-113.
- [27] RODERER G, GEBHARD F, DUERSELEN L, *et al.* Delayed bone healing following high tibial osteotomy related to increased implant stiffness in locked plating [J]. *Injury*, 2014, 45(10): 1648-1652.
- [28] MACLEOD AR, SERRANCOLI G, FREGLY BJ, *et al.* The effect of plate design, bridging span, and fracture healing on the performance of high tibial osteotomy plates: An experimental and finite element study [J]. *Bone Joint Res*, 2018, 7(12): 639-649.
- [29] CLAES L, REUSCH M, GÖCKELMANN M, *et al.* Metaphyseal fracture healing follows similar biomechanical rules as diaphyseal healing [J]. *J Orthop Res*, 2011, 29(3): 425-432.
- [30] VAN EGMOND N, JANSSEN D, HANNINK G, *et al.* Biomechanical comparison of two different locking plates for open wedge high tibial osteotomy [J]. *J Orthop Sci*, 2018, 23(1): 105-111.
- [31] PETERSEN W, WALL A, PAULIN T, *et al.* Stability of two angular stable locking plates for open wedge high tibial osteotomy (HTO): TomoFix versus LOQTEQ(R) HTO plate [J]. *Arch Orthop Traum Su*, 2014, 134(10): 1437-1442.
- [32] HARTZ C, WISCHATTA R, KLOSTERMEIER E, *et al.* Plate-related results of opening wedge high tibial osteotomy with a carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone (CF-PEEK) plate fixation: A retrospective case series of 346 knees [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 466.
- [33] JACQUET C, MARRET A, MYON R, *et al.* Adding a protective screw improves hinge's axial and torsional stability in high tibial osteotomy [J]. *Clin Biomech*, 2020, 74: 96-102.