

· 基础研究 ·

开放获取

柱形金属补块修复膝关节翻修胫骨缺损的有限元分析<sup>△</sup>

唐杞衡, 芮守玮, 周一新\*

(首都医科大学附属北京积水潭医院矫形骨科, 北京 100035)

**摘要:** [目的] 探讨柱形金属补块应用于膝关节翻修胫骨缺损, 对胫骨平台假体稳定性和胫骨平台骨应力的影响。[方法] 利用人工胫骨模型建立三维计算模型, 制作胫骨内侧平台骨缺损并模拟膝关节翻修手术。在传统手术模型中, 使用骨水泥修复骨缺损; 而在柱形金属补块手术模型中, 使用柱形金属补块修复骨缺损。两种手术模型中均使用延长杆和锥形金属补块。给模型加载负荷, 测量和比较两种手术模型的胫骨内侧平台骨-骨水泥界面微动和骨 von Mises 应力。[结果] 传统手术模型和柱形金属补块手术模型中胫骨内侧平台松质骨-骨水泥界面微动的差异无统计学意义 [(1.1±0.3) μm vs (1.0±0.4) μm, P=0.365], 但是, 传统手术模型的胫骨内侧平台皮质骨-骨水泥界面微动显著大于柱形金属补块手术模型 [(2.7±1.2) μm vs (2.6±1.2) μm, P=0.032]。此外, 传统手术模型的胫骨内侧平台松质骨 von Mises 应力显著小于柱形金属补块手术模型 [(0.2±0.0) MPa vs (0.7±0.1) MPa, P<0.001], 尽管两个模型胫骨内侧平台皮质骨 von Mises 应力的差异无统计学意义 [(4.0±1.3) MPa vs (3.9±1.3) MPa, P=0.071]。[结论] 柱形金属补块修复膝关节翻修胫骨缺损, 可以增加假体稳定性和胫骨平台骨应力。

**关键词:** 柱形金属补块, 膝关节翻修, 胫骨, 骨缺损, 有限元分析

**中图分类号:** R681.57

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-8478 (2024) 11-1023-06

**Finite element analysis of pillar metal augment for repairing tibial bone defect in revision knee arthroplasty // TANG Qi-heng, RUI Shou-wei, ZHOU Yi-xin. Department of Orthopaedics, Beijing Jishuitan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100035, China**

**Abstract:** [Objective] To investigate the effect of pillar metal augment used for tibial bone defect in revision knee arthroplasty on the stability of the tibial implant and the bony stress on the tibial plateau. [Methods] Bone defect was created in the medial tibial plateau of a 3D computational model from a composite tibia model, and revision knee arthroplasty was simulated. Cement was used for repairing the tibial bone defect in the traditional revision model (TRM), while pillar metal augment was used for repairing tibial bone defect in the pillar metal augment revision model (PMA). Stem and cone metal augment were used in both revision models. As load was applied to the models, the micromotion at the bone-cement interface and the von Mises stress on the bone of the medial tibial plateau were measured and compared between these two models. [Results] Although there was no significant difference in the micromotion of the cancellous bone-cement interface of the medial tibial plateau between the TRM and PMA [(1.1±0.3) μm vs (1.0±0.4) μm, P=0.365], the TRM proved significantly greater than the PMA in term of the cortical bone-cement interface of the medial tibial plateau [(2.7±1.2) μm vs (2.6±1.2) μm, P=0.032]. In addition, the TRM had significantly lower von Mises stress on cancellous bone of the medial tibial plateau than the PMA [(0.2±0.0) MPa vs (0.7±0.1) MPa, P<0.001], whereas there was no significant difference in von Mises stress on the cortical bone of the tibial plateau between the TRM and the PMA [(4.0±1.3) MPa vs (3.9±1.3) MPa, P=0.071]. [Conclusion] The pillar metal augment used for tibial bone defect in revision knee arthroplasty does improve the stability of the prosthetic component, and increase the stress on cancellous bone of the tibial plateau.

**Key words:** pillar metal augments, revision knee arthroplasty, tibia, bone defect, finite element analysis

膝关节骨缺损在膝关节翻修术中常见。骨缺损的处理是膝关节翻修术的重点。不同的置入物被用来修复骨缺损, 包括骨水泥、植骨、金属垫块、锥形金属补块 (Cone) 等<sup>[1-5]</sup>。这些置入物适用于不同部位和

不同程度的骨缺损, 有不同的优缺点<sup>[6, 7]</sup>。临床常用 AORI 分型 (the Anderson Orthopedic Research Institute classification) 评估膝关节骨缺损<sup>[8]</sup>。AORI I 型骨缺损指小的骨缺损, 干骺端完整, II 型骨缺损指干

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2024.11.12

△基金项目:北京积水潭医院高层次人才“学科骨干”培养计划项目(编号:XKGG202111);北京市属医院科研培育计划项目(编号:PX2023016)

作者简介:唐杞衡,副主任医师,博士,研究方向:关节外科,(电子信箱)mdtang2008@sina.com

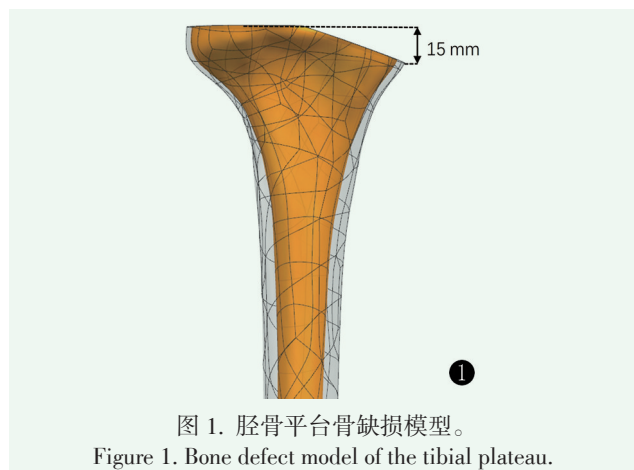
\*通信作者:周一新,(电子信箱)orthoyixin@yahoo.com

髁端骨缺损，累及一侧或双侧股骨髁或胫骨平台，III 型骨缺损指干髁端骨缺损严重，双侧股骨髁或胫骨平台大部分缺损，可能累及侧副韧带或髌韧带附着点。对于 AORI II 型和 III 型胫骨干髁端骨缺损，目前临床上最为常用的处理方法是在胫骨髓内使用延长杆和在胫骨干髁端中央区域使用锥形金属补块来增加假体的稳定性。但是，胫骨干髁端外周区域骨缺损的处理并未受到足够重视。由于锥形金属补块的空间占位影响了传统金属垫块的使用，只能用骨水泥填充外周区域骨缺损。研究表明，骨水泥填充大的骨缺损有导致骨的热坏死和松动的风险，而且骨水泥与骨界面有较高的透亮线发生率<sup>[9]</sup>。近年来，一款新型柱形金属补块 (Pillar) 已经应用于临床，用于膝关节骨缺损的修复重建<sup>[10]</sup>。柱形金属补块为 3D 打印多孔钛金属圆柱体，置入骨缺损部位稳定性好，尤其适用于膝关节外周区域不规则骨缺损，也可以与锥形金属补块组合使用。理论上，柱形金属补块可以增加假体的稳定性并改善骨缺损部位的应力环境，但目前尚无生物力学研究证据。本研究用有限元分析方法，建立膝关节翻修胫骨平台骨缺损模型，研究柱形金属补块对胫骨平台假体稳定性和胫骨平台骨应力的影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 胫骨平台骨缺损模型的建立

本研究中的胫骨模型采用 Sawbones 公司第四代生物力学人工仿真骨骼 (#3401, Sawbones, 美国)<sup>[11, 12]</sup>。将数字三维胫骨模型导入 NX UG12.0 (Siemens PLM Software, 美国)，进行模拟截骨及建立骨缺损模型等操作。在胫骨外侧平台以下 10 mm 处截骨，截骨面垂直于胫骨解剖轴，后倾角为 0°。在胫骨内侧平台建立楔形骨缺损模型，楔形尖部在胫骨近端中心，底部在胫骨内侧平台外周，缺损深度为 15 mm (图 1)。



### 1.2 膝关节翻修手术模型的建立

本研究使用的假体和置入物包括 ACCK 胫骨平台假体、延长杆、锥形金属补块和柱形金属补块 (北京爱康宜诚医疗器材有限公司, 中国)。将数字三维假体和置入物模型导入 NX UG12.0 (Siemens PLM Software, 美国)，进行模拟手术与安装假体等操作。根据胫骨模型尺寸选择匹配的假体和置入物，按照临床膝关节翻修手术操作方法安置入。根据是否使用柱形金属补块建立两个手术模型：传统手术模型和柱形金属补块手术模型。两个模型中均使用锥形金属补块和延长杆：胫骨干髁端中央置入锥形金属补块，锥形金属补块与胫骨平台假体之间用骨水泥填充；延长杆为骨水泥固定型，直径 14 mm，长度 60 mm，骨水泥鞘厚度 2 mm；胫骨平台假体与外侧胫骨平台截骨面之间用骨水泥填充，厚度为 2 mm。传统手术模型中胫骨内侧平台骨缺损空间仅用骨水泥填充，而柱形金属补块手术模型中胫骨内侧平台骨缺损处置入两个柱形金属补块 (内侧平台中心线前后部各 1 个)，柱形金属补块为圆柱体结构，直径为 8 mm，高度为 20 mm，上面与胫骨外侧平台截骨面相平，下部置入松质骨内，其周围的骨缺损空间仍用骨水泥填充 (图 2)。

### 1.3 模型的网格划分和材料属性

将上述模型输入到 ANSYS Workbench 12 (Swanson Analysis Systems, Inc., 美国) 进行网格划分。采用平均边长为 1~3 mm 的线性四面体单元进行网格划分，并在骨-置入物界面处进行局部细化 (边长约 0.5 mm)。网格收敛性分析表明，进一步网格细化后增加的最大位移和应变不到 0.5%。模型中各部件节点数和单元数见表 1。

表 1. 各部件节点数和单元数 Table 1. Number of nodes and units of each component		
部件	节点数	单元数
皮质骨	269 114	168 838
松质骨	280 473	189 525
胫骨平台假体	35 346	21 419
胫骨垫片假体	22 425	13 958
延长杆	45 575	30 255
骨水泥	114 940	70 593
锥形金属补块	31 990	19 901
柱形金属补块	38 597	23 854

本研究所有材料均采用各向同性线弹性材料。根据参考文献赋予模型中各部件的材料属性<sup>[13, 14]</sup>，详见表 2。

表 2. 各部件材料属性  
Table 2. Material properties of each component

部件	杨氏模量 (MPa)	泊松比
皮质骨	15 250	0.3
松质骨	449	0.3
胫骨平台假体	117 000	0.3
胫骨垫片假体	800	0.46
延长杆	117 000	0.3
骨水泥	2 280	0.3
锥形金属补块	117 000	0.3
柱形金属补块	117 000	0.3

#### 1.4 边界条件和载荷设置

模型中各部件的接触设置为：胫骨平台假体与骨水泥、延长杆与骨水泥、金属补块与骨水泥、延长杆骨水泥鞘与骨之间均为绑定界面；胫骨平台截骨面与骨水泥

之间为摩擦界面，摩擦系数为 1；金属补块与骨之间均为摩擦界面，摩擦系数为 0.35<sup>[13, 15]</sup>。

对胫骨平台假体垂直施加 2 030 N（相当于 70 kg 体重的 3 倍）的载荷，将 60% 的载荷（1 160 N）分配到胫骨内侧平台，40% 的载荷（870 N）分配到胫骨外侧平台<sup>[15]</sup>。

对有限元模型进行定量分析，主要观察指标为胫骨内侧平台骨-骨水泥界面微动以及胫骨内侧平台柱形金属补块下平面骨 von Mises 应力。

#### 1.5 统计学方法

采用 SPSS 25.0 软件进行统计学分析。计量资料以  $\bar{x} \pm s$  进行描述，两种手术模型骨-骨水泥界面微动比较和胫骨平台骨应力比较采用配对 *T* 检验。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

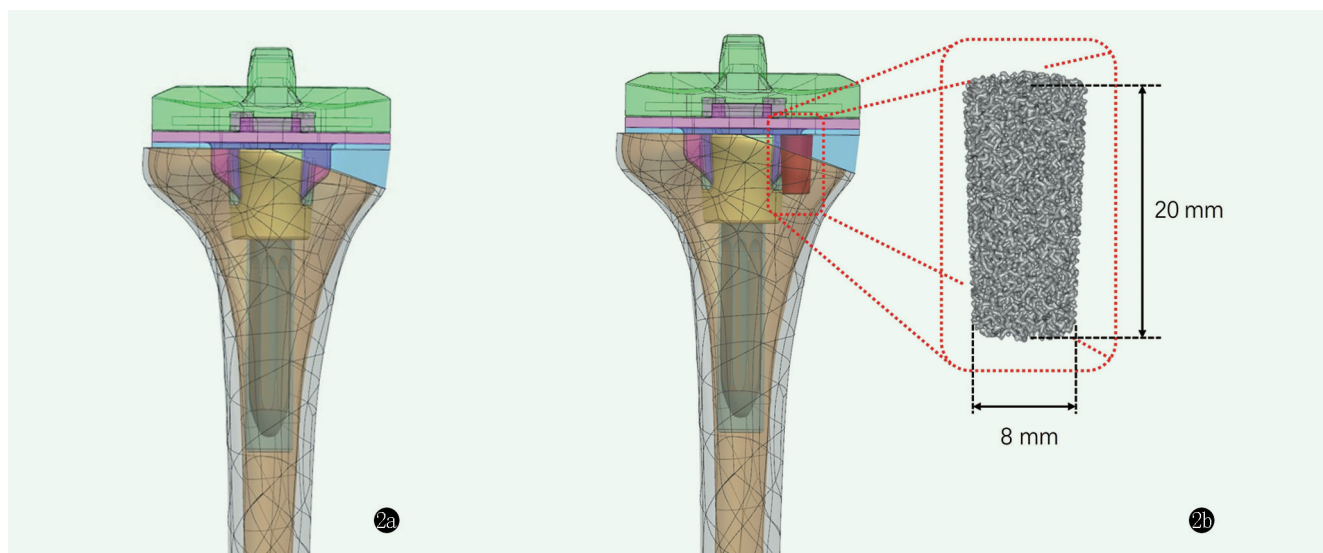


图 2. 膝关节翻修手术模型。2a: 传统手术模型，胫骨内侧平台骨缺损用骨水泥填充；2b: 柱形金属补块手术模型，胫骨内侧平台骨缺损用柱形金属补块修复。

Figure 2. Revision knee arthroplasty model. 2a: Traditional revision model, the medial tibial plateau bone defect filled with bone cement; 2b: Pillar metal augment revision model, the medial tibial plateau bone defect repaired with pillar metal augment.

## 2 结果

### 2.1 胫骨平台骨-骨水泥界面微动

传统手术模型中胫骨平台松质骨-骨水泥界面最大微动为 8.1  $\mu\text{m}$ ，皮质骨-骨水泥界面最大微动为 13.0  $\mu\text{m}$ 。柱形金属补块手术模型中松质骨-骨水泥界面最大微动为 7.9  $\mu\text{m}$ ，皮质骨-骨水泥界面最大微动为 12.8  $\mu\text{m}$ （图 3）。

各模型的胫骨内侧平台骨-骨水泥界面微动见表 3。使用柱形金属补块与不使用柱形金属补块相比，胫骨内侧平台松质骨-骨水泥界面平均微动减小 9.1%，差

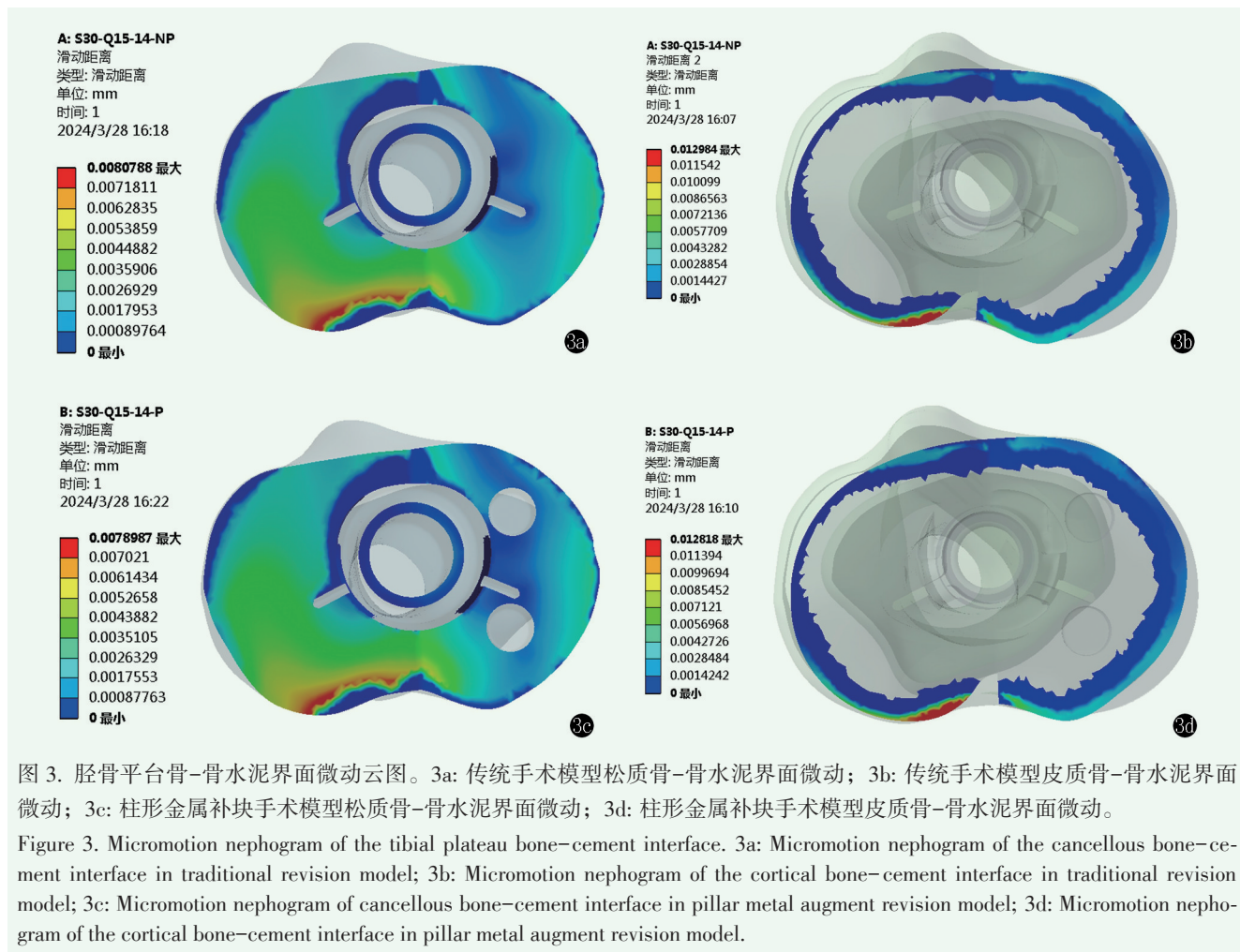
异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )；皮质骨-骨水泥界面平均微动减小 3.7%，差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。

表 3. 胫骨内侧平台骨-骨水泥界面微动 ( $\mu\text{m}$ ,  $\bar{x} \pm s$ )  
Table 3. Micromotion of bone-cement interface of medial tibial plateau ( $\mu\text{m}$ ,  $\bar{x} \pm s$ )

部位	传统手术模型	柱形金属补块手术模型	<i>P</i> 值
松质骨	1.1 $\pm$ 0.3	1.0 $\pm$ 0.4	0.365
皮质骨	2.7 $\pm$ 1.2	2.6 $\pm$ 1.2	0.032

### 2.2 胫骨平台骨 von Mises 应力

传统手术模型中胫骨平台柱形金属补块下平面松质骨最大 von Mises 应力为 0.4 MPa，皮质骨最大应力为 6.2 MPa。柱形金属补块手术模型中松质骨最大应力为 0.9 MPa，皮质骨最大应力为 6.3 MPa（图 4）。



各模型的胫骨内侧平台柱形金属补块下平面骨 von Mises 应力见表 4。使用柱形金属补块与不使用柱形金属补块相比，胫骨内侧平台柱形金属补块下平面松质骨平均应力增加 250%，差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )；皮质骨平均应力减小 2.5%，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。

部位	传统手术模型	柱形金属补块手术模型	P 值
松质骨	0.2±0.0	0.7±0.1	<0.001
皮质骨	4.0±1.3	3.9±1.3	0.071

### 3 讨论

膝关节翻修骨缺损的处理和假体固定一直是膝关节翻修手术面临的困难和挑战。有研究发现，胫骨平台骨缺损面积的大小会显著影响胫骨假体的稳定<sup>[16]</sup>。对于胫骨干骺端较大的骨缺损，临床上常用锥形金属补块重建中央区域骨缺损，而外周区域骨缺

损通常使用骨水泥填充，重建效果并不理想。柱形金属补块为多孔金属圆柱体构型，置入骨缺损部位，可以获得即刻稳定性，后期表面骨长入而获得长期稳定性，适合修复膝关节外周不规则骨缺损，还可以与锥形金属补块组合使用。短期临床随访研究显示，柱形金属补块修复胫骨平台骨缺损，术后临床效果满意，固定可靠，无松动<sup>[10]</sup>。

胫骨平台骨-骨水泥界面微动是反映假体稳定性的重要指标。本研究发现，相对于使用骨水泥填充胫骨内侧平台骨缺损，使用柱形金属补块能够使胫骨内侧平台松质骨-骨水泥界面平均微动减少 9.1%，皮质骨-骨水泥界面平均微动减少 3.7%，说明柱形金属补块增加了胫骨假体的稳定性。当然，本研究中无论是用骨水泥填充骨缺损还是用柱形金属补块修复骨缺损，胫骨平台骨-骨水泥界面最大微动均很小，远低于 50  $\mu\text{m}$ ，可能并无临床实际意义<sup>[17, 18]</sup>。两种骨缺损手术模型的胫骨平台骨-骨水泥界面微动均不大的原因，考虑是两种手术模型中均使用了延长杆和胫骨干骺端中央区域锥形金属补块。Completo 等<sup>[15]</sup>的有限元分析研究发现，与不使用延长杆相比，使用骨

水泥固定型延长杆减少了 23% 的胫骨平台骨-骨水泥界面平均微动, 使用生物固定型延长杆则减少了 19% 的界面平均微动。Xie 等<sup>[13]</sup> 利用膝关节翻修胫骨平台骨缺损有限元模型, 分析了骨水泥固定型延长杆

和锥形金属补块对胫骨假体稳定性的影响。结果发现, 延长杆的使用减少了骨-假体界面微动, 延长杆越长, 骨-假体界面微动越小。

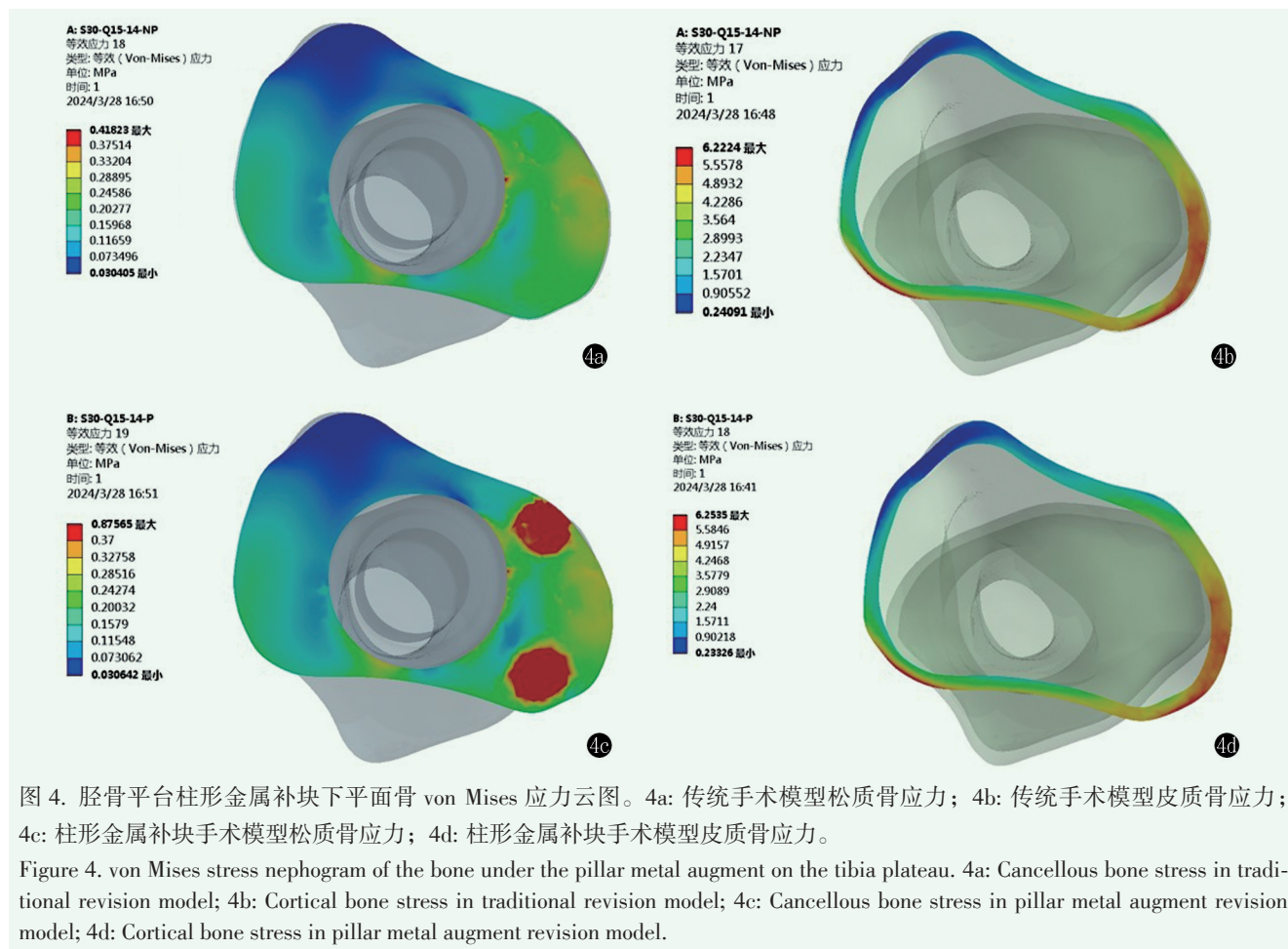


图 4. 胫骨平台柱形金属补块下平面骨 von Mises 应力云图。4a: 传统手术模型松质骨应力; 4b: 传统手术模型皮质骨应力; 4c: 柱形金属补块手术模型松质骨应力; 4d: 柱形金属补块手术模型皮质骨应力。

Figure 4. von Mises stress nephogram of the bone under the pillar metal augment on the tibia plateau. 4a: Cancellous bone stress in traditional revision model; 4b: Cortical bone stress in traditional revision model; 4c: Cancellous bone stress in pillar metal augment revision model; 4d: Cortical bone stress in pillar metal augment revision model.

延长杆和锥形金属补块的使用虽然增加了假体的稳定性, 却带来了胫骨近端应力遮挡的问题<sup>[19-21]</sup>。由于延长杆和锥形金属补块承担了较大的应力, 导致胫骨平台骨应力降低, 可能引起骨质吸收、骨量减少, 从而影响假体固定。LaMonica 等<sup>[14]</sup> 用有限元分析方法构建膝关节翻修胫骨平台骨缺损模型, 研究了延长杆和金属垫块对胫骨平台骨应力的影响。研究发现, 骨水泥固定型延长杆和金属垫块的使用会导致胫骨平台骨应力减小, 延长杆越长胫骨平台骨应力越小, 金属垫块厚度越大胫骨平台骨应力越小。Xie 等<sup>[13]</sup> 的有限元研究也证实, 延长杆的使用导致胫骨近端应力遮挡, 可能会引起骨吸收; 延长杆的使用还会导致延长杆末端周围骨应力集中, 可能引起柄末端区域疼痛及骨折风险。而柱形金属补块的生物力学优势在于, 其上端支撑胫骨平台假体, 下端置入胫骨内侧平台松质骨内, 可以将膝关节载荷传递至胫骨平台松质骨内, 从而减轻延长杆和锥形金属补块的应力遮

挡效应。本研究发现, 与骨水泥填充胫骨内侧平台骨缺损比较, 置入柱形金属补块使其下平面的松质骨平均应力增加 2.5 倍, 而皮质骨应力变化不明显, 证明柱形金属补块增加了胫骨平台内的骨应力, 有助于减轻延长杆和锥形金属补块的应力遮挡效应。

本研究不足之处: (1) 本研究中的载荷设置只模拟了人体行走垂直载荷, 未模拟上下楼、蹲起等动力学环境; (2) 本研究中的柱形金属补块材料设置为钛金属, 不同金属材质 (如钽金属) 有不同的生物力学响应, 需另行测试; (3) 本研究中的延长杆为骨水泥固定型延长杆, 未对生物固定型延长杆进行测试。

综上所述, 有限元分析证实, 柱形金属补块修复膝关节翻修胫骨缺损, 可以增加假体稳定性和胫骨平台松质骨应力, 有助于减轻延长杆和锥形金属补块的应力遮挡效应。柱形金属补块型号多样, 使用灵活方便, 用于修复胫骨平台骨缺损具有良好的应用前景。

## 参考文献

- [1] Ryu JJ, Kim YH, Choi CH. The additional tibial stem extension is not mandatory for the stability of 5mm metal block augmented tibial prosthesis construct in primary total knee arthroplasty: 5-year minimum follow-up results [J]. *Knee Surg Relat Res*, 2023, 35 (1): 5. DOI: 10.1186/s43019-023-00174-6.
- [2] Beckmann NA, Mueller S, Gondan M, et al. Treatment of severe bone defects during revision total knee arthroplasty with structural allografts and porous metal cones—a systematic review [J]. *J Arthroplasty*, 2015, 30 (2): 249–253. DOI: 10.1016/j.arth.2014.09.016.
- [3] Eder-Halbedl M, Fink A, Pietsch M, et al. Excellent mid- to long-term survival of tantalum metal cones in a case series of revision knee arthroplasty with severe bony defects [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2023, 31 (12): 5496–5506. DOI: 10.1007/s00167-023-07593-8.
- [4] 王振虎, 于洋, 龚龙, 等. 初次全膝置换自体骨移植修复胫骨平台骨缺损 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (2): 181–183. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.02.19.  
Wang ZH, Yu Y, Gong L, et al. Bone autografting for repairing tibial plateau defect in primary total knee arthroplasty [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (2): 181–183. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.02.19.
- [5] 汪建军, 代胡明, 经保生. 三种骨移植填充复杂胫骨平台骨折骨缺损比较 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (4): 294–297. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.04.02.  
Wang JJ, Dai HM, Jing BS. Comparison of three bone graft materials used for bone defects in complex tibial plateau fractures [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2021, 29 (4): 294–297. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.04.02.
- [6] Bieganowski T, Buchalter DB, Singh V, et al. Bone loss in aseptic revision total knee arthroplasty: management and outcomes [J]. *Knee Surg Relat Res*, 2022, 34 (1): 30. DOI: 10.1186/s43019-022-00158-y.
- [7] Bauman RD, Lewallen DG, Hanssen AD. Limitations of structural allograft in revision total knee arthroplasty [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2009, 467 (3): 818–824. DOI: 10.1007/s11999-008-0679-4.
- [8] Engh GA, Ammeen DJ. Classification and preoperative radiographic evaluation: knee [J]. *Orthop Clin North Am*, 1998, 29 (2): 205–217. DOI: 10.1016/s0030-5898 (05)70319-9.
- [9] Qiu YY, Yan CH, Chiu KY, et al. Review article: Treatments for bone loss in revision total knee arthroplasty [J]. *J Orthop Surg (Hong Kong)*, 2012, 20 (1): 78–86. DOI: 10.1177/230949901202000116.
- [10] Tang Q, Guo S, Deng W, et al. Using novel porous metal pillars for tibial bone defects in primary total knee arthroplasty [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24 (1): 829. DOI: 10.1186/s12891-023-06962-1.
- [11] Wang X, Li X, Wang C, et al. Stability of three-dimensional printed custom-made metaphyseal cone for tibial bone defects reconstruction: a finite element analysis and biomechanical study [J]. *Orthop Surg*, 2023, 15 (11): 2937–2946. DOI: 10.1111/os.13885.
- [12] Kang KS, Tien TN, Lee MC, et al. Suitability of metal block augmentation for large uncontained bone defect in revision total knee arthroplasty (TKA) [J]. *J Clin Med*, 2019, 8 (3): 384. DOI: 10.3390/jcm8030384.
- [13] Xie S, Conlisk N, Hamilton D, et al. Metaphyseal cones in revision total knee arthroplasty: The role of stems [J]. *Bone Joint Res*, 2020, 9 (4): 162–172. DOI: 10.1302/2046-3758.94.
- [14] LaMonica J, Pham N, Milligan K, et al. How metal augments, polyethylene thickness and stem length affect tibial baseplate load transfer in revision total knee arthroplasty [J]. *Knee*, 2023, 40: 283–291. DOI: 10.1016/j.knee.2022.11.021.
- [15] Completo A, Simões JA, Fonseca F, et al. The influence of different tibial stem designs in load sharing and stability at the cement-bone interface in revision TKA [J]. *Knee*, 2008, 15 (3): 227–232. DOI: 10.1016/j.knee.2008.01.008.
- [16] 陈宣煌, 郑锋, 蔡涵华, 等. AORI I、II型胫骨平台骨缺损对胫骨假体稳定性影响的有限元分析 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2019, 27 (21): 1982–1987. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2019.21.14.  
Chen XH, Zheng F, Cai HH, et al. Finite element analysis on the stability of tibial components with AORI type I and II plateau defects [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2019, 27 (21): 1982–1987. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2019.21.14.
- [17] 王进, 赵广雷, 黄钢勇, 等. 3D打印金属垫块修复全膝关节置换(TKA)术中胫骨平台骨缺损的三维有限元分析 [J]. *复旦学报(医学版)*, 2020, 47 (2): 232–239. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8467.2020.02.015.  
Wang J, Zhao GL, Huang GY, et al. Three-dimensional finite element analysis of 3D-printed metal block for repairing tibia plateau bone defect in total knee arthroplasty (TKA) [J]. *Fudan University Journal of Medical Sciences*, 2020, 47 (2): 232–239. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8467.2020.02.015.
- [18] Taylor M, Barrett DS, Deffenbaugh D. Influence of loading and activity on the primary stability of cementless tibial trays [J]. *J Orthop Res*, 2012, 30 (9): 1362–1368. DOI: 10.1002/jor.22056.
- [19] Xie S, Conlisk N, Hamilton D, et al. A finite element analysis of tibial tritanium cones without stems in varying bone defects [J]. *Knee*, 2020, 27 (3): 656–666. DOI: 10.1016/j.knee.2020.02.019.
- [20] Quevedo González FJ, Meyers KN, Schraut N, et al. Do metaphyseal cones and stems provide any biomechanical advantage for moderate contained tibial defects in revision TKA? A finite-element analysis based on a cadaver model [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2021, 479 (11): 2534–2546. DOI: 10.1097/CORR.0000000000001912.
- [21] Hu J, Gundry M, Zheng K, et al. The biomechanics of metaphyseal cone augmentation in revision knee replacement [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2022, 131: 105233. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2022.105233.

(收稿:2024-02-29 修回:2024-04-15)  
(同行评议专家:冯明利,程立明)  
(本文编辑:宁桦)