

# 经皮椎体后凸成形术中提取表征骨健康状况的力学指标

卢 笙<sup>1</sup>, 刘 盼<sup>2</sup>, 白旭锋<sup>1</sup>, 李震子<sup>1</sup>, 李 浩<sup>1</sup>, 张作启<sup>1\*</sup>, 朱晓彬<sup>3\*</sup>, 祝少博<sup>4\*</sup>

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 郑州大学 力学与安全工程学院, 郑州 450001;  
3. 武汉大学中南医院 脊柱与骨肿瘤科, 武汉 430071; 4. 武汉大学中南医院 创伤骨科, 武汉 430071)

**摘要:**目的 基于经皮椎体后凸成形术(percutaneous kyphoplasty, PKP)的手术环境,提出一种表征松质骨健康状态的力学方法和指标,并验证其可行性和一致性。方法 通过弹性力学理论推导出力学指标  $K$  的表达式和物理意义,然后利用临床影像腰椎 L4 开展三维有限元仿真分析,验证理论结果的有效性,并对不同球囊形状和手术路径验证该方法和指标的一致性。结果 注入液体体积与球囊内压之间呈线性关系,力学指标  $K$  与剪切模量密切相关,而且和骨质疏松程度线性负相关。球囊形状对指标  $K$  计算结果的影响很小,椭球形和圆柱形对比相对差别小于 2%。手术入路路径对指标  $K$  计算结果的影响很小,经椎弓根入路和椎弓根外侧缘路径对比相对差别在 0.5% 以内。结论 该临床在体力学测试方法和指标  $K$  能够表征患者骨的健康状态,且具有很好的一致性。研究结果对于指导 PKP 手术方案优化和术后康复、收集在体松质骨力学性能数据以及改进骨质疏松症的诊疗标准具有重要意义。

**关键词:** 骨质疏松症; 经皮椎体后凸成形术; 力学评估; 在体检测; 有限元分析; 理论推导

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.01.009

## A Mechanical Index Extracted from Percutaneous Kyphoplasty for Bone Health Status Characterization

LU Sheng<sup>1</sup>, LIU Pan<sup>2</sup>, BAI Xufeng<sup>1</sup>, LI Zhenzi<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, ZHANG Zuoqi<sup>1\*</sup>, ZHU Xiaobin<sup>3\*</sup>, ZHU Shaobo<sup>4\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Department of Spine Surgery and Musculoskeletal Tumor, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China; 4. Department of Orthopedics, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China)

**Abstract: Objective** To propose a novel mechanical method and index to *in-vivo* characterize the health status of cancellous bone during the percutaneous kyphoplasty (PKP), and validate its feasibility and consistency.

**Methods** According to the theory of elasticity, the expression and physical significance of the mechanical index  $K$  were given. Then using clinical images of the lumbar spine L4, three-dimensional finite element simulations were

收稿日期: 2024-08-15; 修回日期: 2024-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(12272279, 11720101002, 11772240), 湖北省重点研发项目(2021BCA106), 中央高校基本科研业务费专项资金(2042024kf0034), 广西口腔颌面修复与重建研究重点实验室开放课题(GXKLRROM2102)

通信作者: 张作启, 教授, E-mail: zhang\_zuoqi@whu.edu.cn; 朱晓彬, 副主任医师, E-mail: xiaobin.zhu@whu.edu.cn; 祝少博, 主任医师, E-mail: zhushaobo2000@163.com

\* 为共同通信作者

conducted to verify the validity of the theoretical results, as well as the consistency of the methodology and the indexes were verified for studies of different balloon shapes and puncture routes. **Results** The internal pressure of the balloon linearly varied with the injected fluid volume. The mechanical index  $K$  was closely related to the bone shear modulus and could well reflect the health status of cancellous bones. The balloon shape had a trivial influence on the  $K$  results, and the relative difference between the cylindrical and ellipsoidal shapes was less than 2%. The influence of surgical access route on the  $K$  results was also very small, and the relative difference between the routes by vertebral pedicle and by lateral margin of vertebral pedicle was less than 0.5%. **Conclusions** The *in-vivo* mechanical method and the mechanical index  $K$  can characterize the bone health of patients with good consistency. This study has a great significance for providing guidelines of the optimization of PKP operation plan and postoperative rehabilitation, collecting *in vivo* data of bone mechanical properties, and improving the diagnosis and treatment of osteoporosis in clinic.

**Key words:** osteoporosis; percutaneous kyphoplasty (PKP); mechanical assessment; *in vivo* examination; finite element analysis; theoretical derivation

骨质疏松椎体压缩性骨折 (osteoporotic vertebral compression fracture, OVCF) 多发于老年人群,常引起慢性疼痛,影响正常生活<sup>[1-3]</sup>,而且易伴发椎体畸形,增加邻近椎体骨折风险<sup>[4-5]</sup>。目前,临床上广泛使用经皮椎体后凸成形手术 (percutaneous kyphoplasty, PKP) 作为治疗 OVCF 的方法。PKP 手术是一种微创治疗技术,其关键步骤是通过穿刺路径将球囊导入椎体,注液使其膨胀,之后注入骨水泥以固定骨折部位[见图 1(a)]。在 PKP 手术前期,准确表征患者的骨质疏松程度,对医生有重要指导意义;对于采集在体骨力学性能数据,构建基于力学指标的骨质疏松症评估标准等,均具有重要价值。

现今诊断骨骼健康多依赖骨密度 (bone mineral density, BMD) 检测。然而, BMD 仅能反映骨量多少,并不能反映骨微结构和骨组织材料特性等因素<sup>[6-9]</sup>。因此,基于 BMD 的诊断具有较大的误诊率<sup>[10-11]</sup>。随着我国人口老龄化,骨质疏松发病率持

续增加,OVCF 病例也在急速增长,针对 PKP 手术的研究越来越受到学者重视。例如,Chai 等<sup>[12]</sup>对 142 例 PKP 手术的疗效进行了统计分析,发现在症状主导侧进行单侧 PKP 手术能有效缓解疼痛。Tang 等<sup>[13]</sup>通过 178 名患者的数据对单侧和双侧 PKP 手术疗效进行比较。近年来,有限元仿真也被广泛用于脊柱的生物力学研究中<sup>[14-16]</sup>。有研究通过对椎体进行数值模拟来评估不同 PKP 手术方案的疗效及其对脊柱力学功能的影响<sup>[17-18]</sup>。值得指出的是,多数研究都集中在不同手术方案治疗效果的对比分析。本文针对 BMD 作为骨质疏松诊断依据的局限性,利用 PKP 手术的操作环境,提出了一种新颖的临床在体骨质量测试方法来直接评估椎体骨的健康状况。这种方法具有如下优势:① 在体环境;② 针对个体病人判断;③ 与力学性能直接关联的指标;④ 无额外损伤。该方法流程为:进行 PKP 手术时,通过球囊充盈器[见图 1(b)]记录球囊内压和

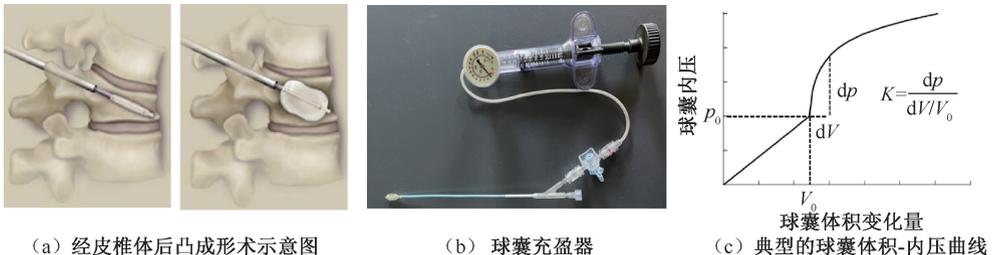


图 1 结合 PKP 手术的临床在体骨力学性能测试技术流程和装备图

**Fig. 1 Clinical *in vivo* bone biomechanical testing technology process and equipment diagrams integrated with PKP surgery** (a) Schematics of percutaneous kyphoplasty (PKP) surgery, (b) Typical equipment of balloon and water injection system, (c) Typical volume-pressure curve

注水量,从而获得压力-体积曲线[见图1(c)],并根据其定义力学指标  $K$  以衡量松质骨力学性能:

$$K = \frac{dp}{dV/V_0}$$

式中: $p_0$ 、 $V_0$  分别为球囊与松质骨最初接触时的压力和体积,随后的增量分别记为  $dp$  和  $dV$ 。本文采用理论推导与有限元模拟结合方法,研究该方法和力学指标  $K$  的可行性和一致性。

## 1 材料与方法

### 1.1 球囊膨胀理论模型

由于在体环境的影响,球囊在穿刺通道中膨胀进而与松质骨发生相互作用的过程比较复杂。为了便于理论推导,需要对模型进行简化假设:① 球囊材料一般为橡胶,考虑到其柔顺性,假定球囊贴合穿刺通道发生膨胀,膨胀后的形状为圆柱型;② 假设松质骨为均质各向同性线弹性材料;③ 松质骨在小变形范围内。不计体力作用,球囊内充水在椎体中膨胀的过程,可视为无限大各向同性弹性体中圆柱型空腔内受静水压力作用发生扩张的过程,进而可转化成轴对称力学问题进行建模(见图2)。

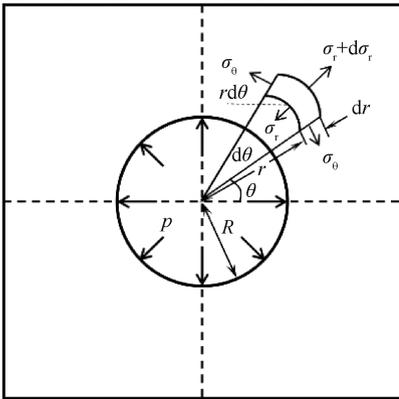


图2 理论模型示意图

Fig. 2 Illustration of the theoretical model

对该模型,列出弹性力学基本控制方程:  
平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \quad (1)$$

式中: $\sigma_r$  为径向正应力; $\sigma_\theta$  为环向正应力。

几何方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{du}{dr} \\ \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \\ \varepsilon_z = \text{const} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_r$  为径向正应变; $\varepsilon_\theta$  为环向正应变; $\varepsilon_z$  为轴向正应变; $u$  为径向位移。

物理方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E}[\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \\ \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}[\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_\theta + \sigma_r)] \\ \gamma_{rz} = \frac{1}{G}\tau_{rz} = \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{rz} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\sigma_z$  为轴向正应力。

利用式(2)可得相容方程

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_\theta}{r} \quad (4)$$

利用  $\varepsilon_z = [\sigma_z - \mu(\sigma_\theta + \sigma_r)]/E$ , 得

$$\frac{d\sigma_z}{dr} = \mu \frac{d(\sigma_\theta + \sigma_r)}{dr} \quad (5)$$

将式(3)和(5)代入式(4),得

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_\theta}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r}{dr} - \mu^2 \frac{d\sigma_\theta}{dr} - \mu^2 \frac{d\sigma_r}{dr} = \\ \frac{1+\mu}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) \end{aligned} \quad (6)$$

将式(1)代入式(6)并积分,可得仅含径向应力  $\sigma_r$  的微分方程,即

$$\frac{d}{dr}(r^2\sigma_r) = 2Ar \quad (7)$$

式中: $A$  为常数。

继续积分,解得  $r^2\sigma_r - r^2A$  等于常数,令其为  $-B$ ,可得

$$\begin{cases} \sigma_r = A - B/r^2 \\ \sigma_\theta = A + B/r^2 \end{cases} \quad (8)$$

利用边界条件:

$$\begin{cases} r = R, & \sigma_r = p \\ r = \infty, & \sigma_r = 0 \end{cases} \quad (9)$$

解得

$$A = 0, \quad B = pR^2 \quad (10)$$

回代得到应力解:

$$\begin{cases} \sigma_r = -p \frac{R^2}{r^2} \\ \sigma_\theta = p \frac{R^2}{r^2} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(2)和(3),得径向位移

$$u = \frac{p}{E}(1 + \mu)R \quad (12)$$

因为模型中圆柱的高约为底面半径的 10 倍,所以小变形条件下只需考虑径向变形带来的体积变化,略去高阶微量,求得球囊体积变化量为

$$\begin{aligned} dV &= \pi(R + u)^2 h - \pi R^2 h = \\ &2\pi R^2 h(1 + \mu) \frac{dp}{E} \end{aligned} \quad (13)$$

可以看出,球囊内压变化量和注入液体体积之间为线性关系。

$K$  的定义如下:

$$K = \frac{dp}{dV/V_0} = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (14)$$

式中: $V_0$  为空腔的初始体积。从定义式形式上看,力学指标  $K$  类似于体积模量的表达,但通过上述理论推导可知, $K$  等于基体材料(松质骨)的剪切模量,在有限元计算中可以得到进一步验证。总而言之, $K$  是一个与材料弹性模量和泊松比相关的力学量,能够直接反映松质骨的力学性质,用以衡量松质骨健康状态。

## 1.2 有限元模型建立准备

**1.2.1 影像学资料** 对 1 名 34 岁男性受试者(脊椎骨折疾病记录)脊椎进行 CT 扫描,得到 305 张二维 CT 图像。二维 CT 图像的分辨率为  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ,相邻图像间距为  $1 \text{ mm}$ 。

**1.2.2 设备及软件** 采用 Mimics 19.0(Materilise 公司,比利时)和 Geomagic Wrap 2021(3D Systems 公司,美国)软件构建 L4 椎体三维模型。网格划分采用 Hypermesh 2017(Altair Engineering 公司,美国)软件。有限元模拟在 ABAQUS 2016(Dassault SIMULIA 公司,法国)中完成。

## 1.3 腰椎有限元模型

**1.3.1 有限元模型建立流程** 将全部 CT 图像导入 Mimics 中,进入图像编辑界面并自动生成冠状位

和矢状位的二维图像。通过调整灰度值阈值生成蒙版去除椎体周围软骨和其他非骨组织,之后利用蒙版编辑去除腰椎 L4 节段周围的其他骨组织,同时根据灰度值和几何特征的差异,将皮质骨和松质骨区分开。通过三维计算生成表面粗糙的立体模型,最后将立体模型导出为 stl 格式文件。至此,完成了腰椎 L4 节段粗糙三维模型的重建任务。为了便于网格剖分,对腰椎模型进行表面处理。将模型导入 Geomagic Wrap 中,对模型中的缺陷进行修补,略微调整平滑级别参数以避免改动过大使模型丢失真实的几何面貌。最后,将优化后的模型保存为 step 格式文件,得到腰椎 L4 段理想几何模型。为了提高网格质量,采用 Hypermesh 2017 对理想几何模型进行网格划分。使用特征长度约  $1 \text{ mm}$  的 C3D4 四面体单元以保留椎骨的几何特征和保证计算的收敛性,单元总计 40 万个。

为了后续研究球囊形状的影响,对模型设置了两种形状的空腔:①圆柱型,高为  $20 \text{ mm}$ ,底面圆的直径为  $4 \text{ mm}$ ;②椭球型,其三轴的长度分别为  $20$ 、 $4$ 、 $4 \text{ mm}$ 。松质骨和皮质骨在界面上通过共节点连接,符合两者互相连接的实际情况,也可有效保证皮质骨对松质骨的约束作用(见图 3)。

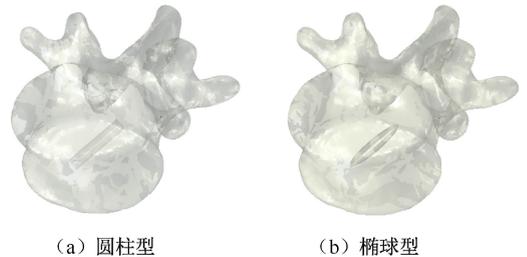


图 3 不同形状球囊模型

Fig. 3 Models with different balloon shapes (a) Cylindrical balloon model, (b) Elliptical balloon model

**1.3.2 材料属性赋值** 在 Hypermesh 中将三维模型以 inp 格式文件导出,在此过程中对腰椎各部分的材料属性进行设置。手术中使用的球囊充盈器的球囊尺寸为  $\text{mm}$  级,远大于松质骨骨小梁的微观特征尺寸,故将松质骨作为连续均质材料进行建模,而不考虑其微观结构特征是合适的。这种均质化建模可以避免复杂的微观几何和繁多的接触面,从而提高有限元计算的稳定性和效率。为了方便与理论模型对比,将皮质骨和松质骨假设为各向同

性线弹性材料<sup>[20]</sup>。其中,皮质骨的密度为 $1.8\text{ g/cm}^3$ ,弹性模量为 $12\text{ GPa}$ ,泊松比为 $0.3$ ;松质骨的密度为 $0.6\text{ g/cm}^3$ ,弹性模量为 $100\text{ MPa}$ ,泊松比为 $0.2$ 。

**1.3.3 边界条件及加载情况** 在PKP手术时,患者处于俯卧位,脊柱处于放松状态,可视为无外部荷载,故仅在模型的下表面施以固定边界条件约束,以防止刚体位移。利用ABAQUS中的流体腔函数模拟松质骨内球囊的膨胀,为了不超出手术中球囊内的最大水压,流体腔最大内压设定为 $1.5\text{ MPa}$ 。

## 2 结果

### 2.1 可行性验证

在本文的有限元模型中,松质骨被建模为具有等效力学性能的均质各向同性线弹性材料。因此,可以通过降低松质骨的弹性模量,来表征其骨质疏松程度,即将骨质疏松程度定义为骨质疏松松质骨弹性模量相比健康松质骨弹性模量降低的百分比。

有限元计算显示,球囊内压与注入液体体积呈线性关系,验证了理论解中球囊内部压力变化量和

注入液体体积之间为线性关系的结论[见图4(a)]。这种线性关系将为测试操作和指标 $K$ 的计算提供极大的便利。

本文发现,理论预测和有限元计算的力学指标 $K$ 均随骨质疏松程度的增加而线性降低[见图4(b)],符合理论式(14)的预测,这种线性负相关说明了使用 $K$ 作为松质骨骨质疏松程度表征指标的合理性。理论预测和有限元计算结果在数值上有一定的差别,主要原因分析如下:① 网格剖分的影响导致有限元模型中空腔初始体积比理论模型小,相同内压增量下体积的变化量也偏小, $K$ 偏大;② 较弹性理论解,位移法有限元的刚度矩阵是偏刚硬的;③ 有限元模型中松质骨外围包裹着皮质骨,而理论模型中则不存在,皮质骨会对松质骨产生约束作用。

在弹性模量不变的条件,通过改变骨材料泊松比进一步探究力学指标 $K$ 的物理意义。有限元计算和理论结果均显示,力学指标 $K$ 随泊松比的增大而减小[见图4(c)]。根据弹性理论,随着泊松比的增加,剪切模量减小,而体积模量增大;因此,该结果一定程度上证实了式(14)的正确性。

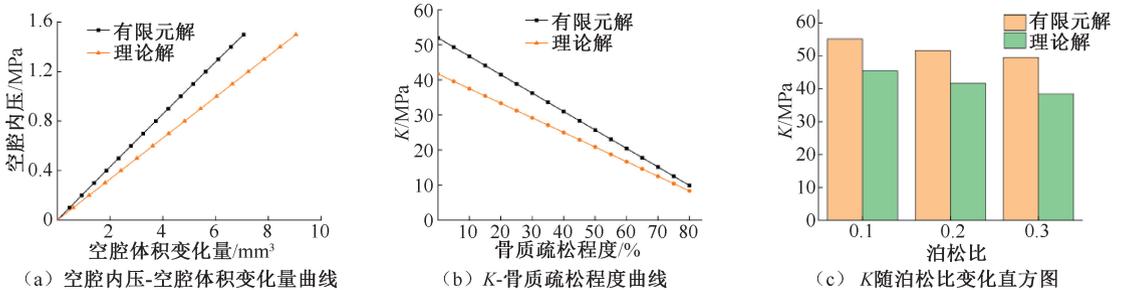


图4 理论与数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of theoretical and numerical simulation results (a) Intracavity pressure-cavity volume change curves, (b)  $K$ -osteoporosis degree curves, (c) Histogram of  $K$  varying with the Poisson's ratio

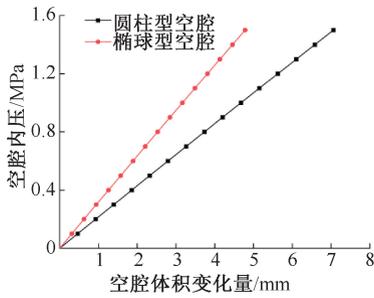
### 2.2 球囊形状的影响

球囊膨胀的最终形状由球囊的初始几何外形、材料性质和周围松质骨的力学性能共同决定,很难被准确预测。为了探究该骨健康状况表征方法和力学指标 $K$ 的稳定性和一致性,研究球囊形状的影响十分必要。本文主要考虑两种空腔形状(圆柱型和椭球型),通过有限元仿真对比分析球囊形状对指标的影响。结果表明,无论是椭球型还是圆柱型的球囊,内部压力与注入液体体积之间的线性关系

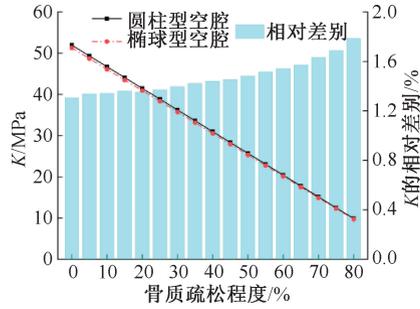
仍保持良好[见图5(a)]。力学指标 $K$ 随骨质疏松程度的增加而线性降低,而且两条线几乎重合,最大相对差别小于 $2\%$ [见图5(b)]。该结果说明, $K$ 的计算结果以及 $K$ 和骨质疏松程度之间的关系几乎不受球囊膨胀形状的影响,这种稳定性和鲁棒性将有利于保障该方法测试结果的一致性,便于在临床上的推广应用。

### 2.3 穿刺路径的影响

在PKP手术中,首先要进行穿刺以形成工作通



(a) 空腔内压与空腔体积变化量关系



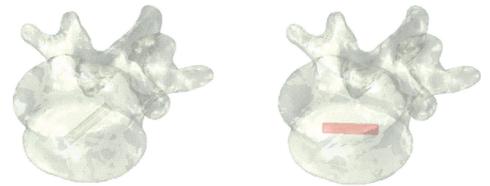
(b) K与骨质疏松程度关系

图 5 球囊形状影响示意图

Fig. 5 Schematic diagram for effects of balloon shapes (a) Variation of intracavity pressure with cavity volume change, (b) Variation of K with osteoporosis degree

道<sup>[21]</sup>。由于患者体型、脊柱形态、病变椎体的压缩程度等因素存在差异,医生对不同的病例可能采用不同的穿刺路径。其中,经椎弓根入路路径是国内大多数 PKP 手术的首选。该路径解剖标志清晰,容易被医生识别和接受,且穿刺过程不易损伤神经根或脊髓[见图 6(a)]。然而,该穿刺路径在单侧穿刺时穿刺针很难到达对侧椎体位置。为了解决这一问题,一些手术病例会采用椎弓根外侧缘路径[见图 6(b)],这种入路方式更易使穿刺针越过椎体中线<sup>[22]</sup>。这一穿刺路径缺点在于解剖标志并不明显,且注入的骨水泥更容易发生渗漏。这两种穿刺路径相应地生成了球囊在椎体内的两种方位,故穿刺路径影响的本质是穿刺路径差异导致的不同位置几何形态相异的皮质骨约束的影响。因此,需要研究这两种穿刺路径是否会影响测量 K 值的一致性。鉴于前文已证明球囊形状的影响可以忽略,本研究中有有限元模型只考虑圆柱型空腔,而松质骨材料仍设置为各向同性,以便与理论

结果进行比较。



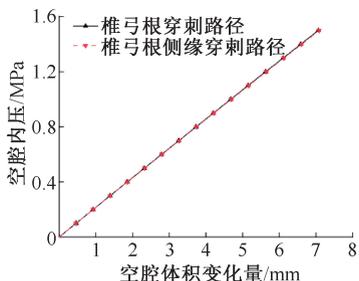
(a) 椎弓根穿刺路径 (b) 椎弓根侧缘穿刺路径

图 6 不同穿刺路径示意图

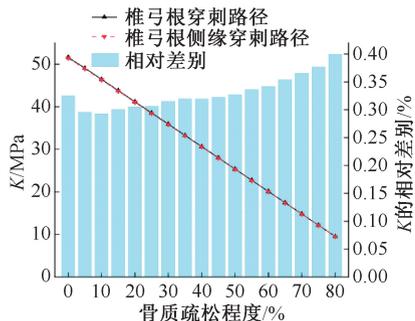
Fig. 6 Schematic diagram of different puncture routes

(a) Puncture route by vertebral pedicle, (b) Puncture route at lateral margin of vertebral pedicle

结果显示,无论是哪种穿刺路径,球囊内压与注入液体体积之间的线性关系依旧不变[见图 7(a)]。对于不同程度的骨质疏松,两种穿刺路径的 K 值相差很小,最大相对差别小于 0.4% [见图 7(b)],说明选择不同的穿刺路径会导致皮质骨对松质骨的几何约束作用发生变化,但并不会影响该测量方法的应用和指标 K 的一致性。



(a) 空腔内压与空腔体积变化量关系



(b) K与骨质疏松程度关系

图 7 穿刺路径影响示意图

Fig. 7 Schematic diagram for effects of puncture paths (a) Variation of intracavity pressure with cavity volume change, (b) Variation of K with osteoporosis degree

### 3 结论与讨论

本文利用 PKP 手术的环境,在对患者无额外损伤的条件下,提出了一种在体检测骨骼健康状况的力学方法和指标。根据记录的球囊内压-注入液体体积的曲线,定义了一个力学指标  $K$  来定量表征椎体松质骨的力学性能,进而衡量松质骨的骨质疏松程度。采用理论推导与有限元仿真的方法,系统研究力学指标  $K$  的物理意义及该方法的可行性和一致性。主要结论如下:

(1) 理论模型从原理上揭示出注入液体体积与球囊内压之间呈现线性关系,力学指标  $K$  和周围松质骨的剪切模量紧密关联。总体上,理论模型和有限元计算给出的规律一致,证实了定义指标的有效性和测量方法的可行性。

(2) 有限元计算结果显示,球囊形状对指标  $K$  的影响很小,椭球形和圆柱形对比相对差别小于 2%,说明该力学方法和指标对球囊的具体形状不敏感,有利于保障测量结果的一致性。

(3) 有限元计算结果显示,手术入路路径对指标  $K$  的影响很小,经椎弓根入路和椎弓根外侧缘路径对比相对差别在 0.5% 以内。这说明该测量方法和指标能抵抗皮质骨几何形态的干扰,具有良好的稳定性。

在评估松质骨骨质疏松程度时, $K$  作为力学指标,相对目前常用的 BMD 检测有其独特的优势。 $K$  由弹性理论推导得出,具有坚实的理论基础,能直接反映松质骨的力学性能,与松质骨的实际承载能力紧密相关。早期以及糖尿病等引起的骨质疏松可能骨密度变化并不明显,而整体力学性能已有明显的劣化。力学指标  $K$  综合考虑了松质骨的结构、成分和骨量的影响,能够更直接、全面反映松质骨的力学性能,对骨质疏松程度的表征和骨折风险的预测具有更高的精准度。

在骨质疏松症的临床诊断上,一直依赖间接的医学影像指标和基于统计意义的诊断标准,个性化差,误诊率高。在无附加损伤条件下,本文提出的临床在体测试方法和指标  $K$  能够直接反映病患个体松质骨的力学性能,对于设计和优化临床手术方案,综合评估手术治疗效果和患者再次骨折风险,以及针对高风险患者制定个性化的康复护理方案

等具有重要的参考和指导意义。本文提出新型测量方法基于现有的医疗设备——球囊充盈器,已被骨科临床医生熟练掌握和使用,有利于该方法的临床推广和应用。虽然本文主要研究了所提测试方法在 PKP 手术中的应用,但是对于术中需要打孔或穿刺形成通道的其他骨科临床手术环境,该测试方法都可以很方便地推广应用。在体骨力学性能测试方法在临床的广泛使用,将为测量和收集国人在体骨力学性能数据库的建设和数字化骨科的发展具有重要意义。当然,本测试方法和指标的研究仍处在概念提出和原理性验证的初步阶段,对于其在临床上的具体应用方案和可行性论证等仍需要更多更细致的计算分析和实验验证工作,这也是今后的重点研究方向。

**利益冲突声明:** 无。

**作者贡献声明:** 卢笙负责模型建立、数据分析和论文初稿撰写;刘盼负责研究方案设计和白旭峰负责计算模型建立和数据分析;李震子和李浩提供研究难点指导;张作启负责研究思路提出和研究方案设计、论文撰写、经费获取;朱晓彬负责材料支持和研究思路提出;祝少博负责材料支持和经费获取。

#### 参考文献:

- [1] 张华锋,周华亮,朱榕辉,等. 骨质疏松椎体压缩性骨折治疗现状及展望[J]. 中国老年保健医学, 2023, 21(6): 85-91.
- [2] GOLD DT. The clinical impact of vertebral fractures: Quality of life in women with osteoporosis [J]. Bone, 1996, 18(3): S185-S189.
- [3] JOHNELL O. Advances in osteoporosis: Better identification of risk factors can reduce morbidity and mortality [J]. J Intern Med, 1996, 239(4): 299-304.
- [4] NEVITT MC, THOMPSON DE, BLACK DM, et al. Effect of alendronate on limited-activity days and bed-disability days caused by back pain in postmenopausal women with existing vertebral fractures [J]. Arch Intern Med, 2000, 160(1): 77-85.
- [5] BELMONT PJ, POLLY DW, CUNNINGHAM BW, et al. The effects of hook pattern and kyphotic angulation on mechanical strength and apical rod strain in a long-segment posterior construct using a synthetic model [J]. Spine, 2001, 26(6): 627-635.
- [6] KEAVENY TM, MORGAN EF, NIEBUR GL, et al.

- Biomechanics of trabecular bone [J]. *Annu Rev Biomed Eng*, 2001(3): 307-333.
- [ 7 ] KANIS JA. Diagnosis of osteoporosis and assessment of fracture risk [J]. *Lancet*, 2002, 359(9321): 1929-1236.
- [ 8 ] BOUXSEIN ML. Bone quality: Where do we go from here? [J]. *Osteoporosis Int*, 2003(14): S118-S127.
- [ 9 ] DAVISON KS, KENDLER DL, AMMANN P, et al. Assessing fracture risk and effects of osteoporosis drugs: Bone mineral density and beyond [J]. *Am J Med*, 2009, 122(11): 992-997.
- [10] BLAKE GM, GRIFFITH JF, YEUNG DKW, et al. Effect of increasing vertebral marrow fat content on BMD measurement, T-score status and fracture risk prediction by DXA [J]. *Bone*, 2009, 44(3): 495-501.
- [11] MCNAMARA LM. Perspective on post-menopausal osteoporosis: Establishing an interdisciplinary understanding of the sequence of events from the molecular level to whole bone fractures [J]. *J R Soc Interface*, 2010, 7(44): 353-372.
- [12] CHAI X, XU JW, YAO Y, et al. Does the choice of operative side affect the clinical outcome of unilateral percutaneous kyphoplasty for osteoporotic vertebral compression fracture? [J]. *Pain Physician*, 2023, 26(2): 175-185.
- [13] TANG J, GUO CW, HU JF, et al. Unilateral and bilateral percutaneous kyphoplasty for thoracolumbar osteoporotic compression fractures [J]. *J Coll Physicians Surg Pak*, 2019, 29(10): 946-950.
- [14] 刘祥飞, 何金国, 蒋钰钢, 等. 单侧与双侧入路椎体成形术治疗老年骨质疏松性椎体压缩骨折的有限元分析及临床应用 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(3): 218-223.
- LIU XF, HE JG, JIANG YG, et al. Finite element analysis and clinical application of unilateral/bilateral percutaneous vertebroplasty for treating osteoporotic vertebral compression fractures in elderly patients [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(3): 218-223.
- [15] 李家琼, 王冬梅, 孙璟川, 等. n-HA/PA66 椎体增强器和椎体成形术治疗骨质疏松性椎体骨折的生物力学效果对比 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(6): 529-536.
- LI JQ, WANG DM, SUN JC, et al. Comparison of biomechanical effects on n-HA/PA66 vertebral body cage and percutaneous vertebroplasty for treating osteoporotic vertebral fractures [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(6): 529-536.
- [16] 李家琼, 王冬梅, 孙璟川, 等. 骨水泥对椎体成形术治疗胸腰椎骨质疏松压缩性骨折的生物力学影响 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(1): 6-12.
- LI JQ, WANG DM, SUN JC, et al. Biomechanical effects of cement volume on treatment of thoracolumbar compression fracture with vertebroplasty [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(1): 6-12.
- [17] ABBASI-GHIRI A, EBRAHIMKHANI M, ARJMAND N. Novel force-displacement control passive finite element models of the spine to simulate intact and pathological conditions; comparisons with traditional passive and detailed musculoskeletal models [J]. *J Biomech*, 2022(141): 111173.
- [18] YAN JW, LIAO Z, YU YF. Finite element analysis of dynamic changes in spinal mechanics of osteoporotic lumbar fracture [J]. *Eur J Med Res*, 2022, 27(1): 142.
- [19] 盛国栋. 基于力反馈的主从式机器人辅助脊椎穿刺手术系统 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [20] DENOZIERE G, KU DN. Biomechanical comparison between fusion of two vertebrae and implantation of an artificial inter-vertebral disc [J]. *J Biomech*, 2006(39): 766-775.
- [21] HIDE IG, GANGI A. Percutaneous vertebroplasty: History, technique and current perspectives [J]. *Clin Radiol*, 2004, 59(6): 461-467.
- [22] ZHU D, HU JN, WANG L, et al. A Comparison between modified unilateral extrapedicular and bilateral transpedicular percutaneous kyphoplasty in the treatment of lumbar osteoporotic vertebral compression fracture [J]. *World Neurosurg*, 2022(166): E99-E108.