

# 骨水泥填充与髓芯减压植骨改善坏死股骨头力学性能的实验研究

李思维, 陈林林, 张皎玥, 孙莉娜, 谭跃龙

(中国医科大学第八临床学院, 鞍钢集团公司总医院骨科, 辽宁 鞍山 114002)

**摘要** **目的** 探讨坏死股骨头内部空间结构及力学性能改变, 对比研究髓芯减压植骨和骨水泥填充对改善坏死股骨头力学性能及预防股骨头塌陷的作用。**方法** 收集2020年6月至2022年1月于我院行髋关节置换患者切除的股骨头标本32例, 分为TFF组(来源于股骨颈骨折患者的股骨头标本)、ONFH组(坏死股骨头)、CPI组(坏死股骨头注射骨水泥)和CDBG组(坏死股骨头模拟行髓芯减压植骨), 每组8例。CPI组和CDBG组的植骨和骨水泥填充在X射线引导下进行。收集患者的性别、年龄等资料, 所有样本进行MicroCT扫描和三维重建。计算并分析股骨头的微观结构参数。采用力学加载实验评价股骨头刚度及最大载荷的变化。**结果** TFF组股骨头内部各区域骨小梁排列规则有序; ONFH组股骨头内侧及外侧区域明显疏松化, 坏死区骨小梁出现断裂, 排列杂乱无序, 硬化区骨小梁排列无序、增粗。股骨头坏死区的生物力学性能明显减弱, 坏死区的刚度及最大载荷均明显下降。CPI组和CDBG组刚度及最大载荷均有所改善, 而CPI组的生物力学性能改善更为明显。**结论** 坏死股骨头内部空间结构发生明显改变, 力学性能显著下降。骨水泥填充和植骨均可改善股骨头的生物力学性能, 提高负荷能力。骨水泥填充可能是一种治疗股骨头坏死的实用方法。

**关键词** 股骨头坏死; 骨水泥填充; 力学分析; 骨微观结构参数

中图分类号 R684.7 文献标志码 A 文章编号 0258-4646(2024)11-0994-05

网络出版地址 <https://link.cnki.net/urlid/21.1227.R.20241120.1429.026>

DOI: 10.12007/j.issn.0258-4646.2024.11.007

## Comparative study on bone cement filling and core decompression improve mechanical properties of the necrotic femoral head

LI Siwei, CHEN Linlin, ZHANG Jiaoyue, SUN Lina, TAN Yue-long

(Department of Orthopaedic, Ansteel Group General Hospital, Eighth Clinical College of China Medical University, Anshan 114002, China)

**Abstract** **Objective** To investigate the changes in the structural parameters and mechanical properties of the necrotic femoral head and compare the effects of core decompression and bone grafting with those of bone cement filling on the mechanical properties and prevention of articular surface collapse of the necrotic femoral head. **Methods** Thirty-two fresh human femoral heads were collected from patients who underwent total hip arthroplasty at our hospital between June 2020 and January 2022. The femoral heads were divided into four groups: 8 femoral neck fractures (TFF group), 8 osteonecrosis of the femoral head (ONFH group), 8 osteonecrosis of the femoral head treated with cement percutaneous injection (CPI group), and 8 osteonecrosis of the femoral head treated with core decompression and bone graft (CDBG group). Cement filling or core decompression was performed under radiographic guidance. All samples were scanned and three-dimensionally reconstructed using micro-CT. The spatial heterogeneity of the femoral head was observed, and the bone morphometric parameters of each region of interest were calculated. Mechanical analysis was performed to evaluate the femoral head parameters of displacement and stress in vitro. **Results** Bone microarchitecture and morphometry in necrotic femoral heads were markedly altered. The biomechanical properties of the necrotic zone in the femoral head were markedly weakened. After the necrotic area was filled with bone cement, the biomechanical properties of the necrotic zone of the femoral head increased significantly. In addition, after core decompression and bone grafting in the necrotic area, the biomechanical properties increased significantly in the necrotic zone of the femoral head. **Conclusion** Bone cement filling or bone grafting in the necrotic area can change the biomechanical mechanism of the femoral head, improve the load-supporting ability, and prevent femoral head collapse. Cement filling may be a practical approach for the treatment of osteonecrosis of the femoral head that can be useful for practicing orthopedists.

**Keywords** osteonecrosis of the femoral head; cement filling; mechanical analysis; bone morphometric parameters

基金项目: 环球医疗重点课题扶持基金(2022001)

作者简介: 李思维(1987-), 男, 主治医师, 硕士.

通信作者: 谭跃龙, E-mail: 582837247@qq.com

收稿日期: 2024-04-30

网络出版时间: 2024-11-21 11:03:10

股骨头坏死 (osteonecrosis of the femoral head, ONFH) 是一种难治性疾病,其特征是各种因素引起的血液供应不足导致骨髓和骨细胞死亡,通常会导致关节面塌陷和继发性髋关节骨性关节炎<sup>[1]</sup>。改善股骨头内血运、重建骨质,保护股骨头的完整性和维持股骨头内力学稳定,是治疗ONFH的关键和基础<sup>[2]</sup>。

随着外科技术的发展,保留股骨头的手术治疗方法越来越多,但术式的选择仍存在较大争议。1985年,FICAT等报告了髓芯减压术治疗的长期结果<sup>[3]</sup>。目前早期病例多采用髓芯减压及其改良术式,但是对于已经出现不同程度塌陷的中期病例,尚无理想的治疗方法,常规的游离植骨术、截骨术、带血管蒂的骨瓣移植等方法并不能完全避免股骨头的继续塌陷<sup>[4-8]</sup>。

近年来,经皮注射骨水泥已经被广泛用于治疗骨肿瘤、骨质疏松性椎体骨折和有症状的关节旁骨内囊肿,包括髌臼、胫骨近端、胫骨远端、距骨和跟骨<sup>[9-11]</sup>。有研究<sup>[12]</sup>报道了通过切开复位和骨水泥填充治疗的Ⅲ期ONFH患者19例,证实骨水泥填充是一种有价值的治疗选择,有助于防止患者股骨头塌陷并缓解症状。周建伟等<sup>[13]</sup>通过球囊扩张骨水泥填充ONFH区域,增强了股骨头的支撑能力,有效抵抗了股骨头塌陷,并有可能避免股骨头进一步塌陷。然而,这种方法对坏死股骨头早期力学性能的作用并不清楚<sup>[14]</sup>。本研究通过研究坏死股骨头内部空间结构及力学性能的改变,旨在明确髓芯减压植骨和骨水泥填充对改善坏死股骨头力学性能及预防股骨头塌陷的作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 一般资料

收集2020年6月至2022年1月于我院行全髋关节置换术的股骨头标本,包括股骨颈骨折标本和ONFH标本。纳入标准:所有股骨头行显微CT扫描,坏死区位于中间区域<sup>[15]</sup>。排除标准:合并糖尿病、肿瘤、肾性骨病、强直性脊柱炎和其他骨代谢紊乱。共32例标本纳入研究。本研究所有股骨头标本在患者知情同意下获得,并经医院伦理委员会批准。

将股骨头标本分为TFF组(来源于股骨颈骨折患者的股骨头标本)、ONFH组(坏死股骨头)、CPI组

(坏死股骨头注射骨水泥)和CDBG组(坏死股骨头模拟行髓芯减压植骨),每组8例。所有标本用生理盐水浸泡纱布包裹保存,-20℃保存。标本在室温下解冻。

### 1.2 显微CT

取出股骨头标本,室温下放置。样品完全融化后,将样品固定在Micro-CT机(西门子医疗系统有限公司,Inveon)扫描板上进行扫描,扫描电压80 V、电流80 μA、曝光时间1 500 ms、分辨率52 μm。通过仪器自带软件对扫描标本进行三维重建及分析,感兴趣区域(region of interest, ROI)冠状面上从股骨坏死区周围的软骨下松质骨(横截面直径10 mm,高0.52 mm)中选取。观察股骨头的空间结构分布,并计算各ROI的骨小梁微观结构参数。为保证各组间的一致性,以坏死区中间层为起点,在冠状面向两侧各选择10层。

本研究包括5个骨形态学参数,分别为骨体积/总体积(bone volume/tissue volume, BV/TV)、骨小梁厚度(trabecular thickness, Tb.Th)、骨小梁数量(trabecular number, Tb.N)、骨小梁间距(trabecular spacing, Tb.Sp)和骨小梁模式因子(trabecular bone pattern factor, TBPf)。

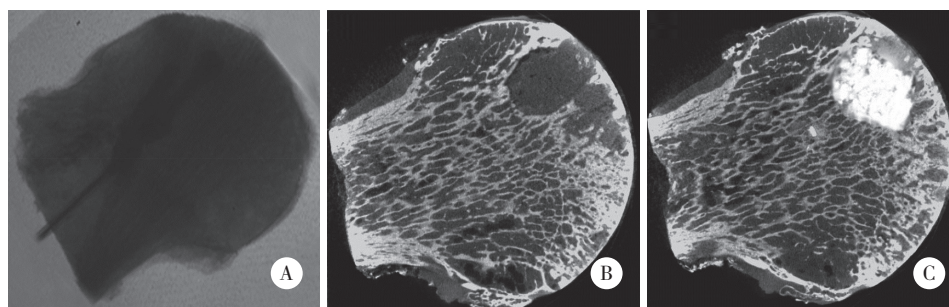
### 1.3 植骨与骨水泥填充

CPI组采用X线透视和显微CT扫描坏死股骨头并定位坏死区位置,坏死区位于负重区的股骨头纳入本研究。先以2 mm 克氏针在X射线透视下平行股骨颈纵轴方向穿刺至软骨下囊性变区,距离软骨面下方约3~5 mm。更换直径为5 mm的工作通道,建立通路。尽可能清除死骨,并用刮匙进一步刮除股骨头内坏死骨。根据坏死区的大小,缓慢注入骨水泥约1~3 mL,确保水泥无泄漏(图1)。待水泥凝固不再放热后,撤出工作管道。

CDBG组先以2 mm 克氏针在X射线透视下确定病灶。克氏针引导下用直径5 mm空心钻前进减压至股骨头软骨下3~5 mm,尽可能清除死骨,并用刮匙进一步刮除股骨头内坏死骨。

通过减压通道冲洗清除减压区已游离的坏死组织。最后,将松质骨从原坏死区域的空腔开始逆行填充并打压。再次透视检查确认整个空腔被填满。

### 1.4 力学加载实验



A, kirschner needle was punctured into the necrotic area under X-ray fluoroscopy guidance; B, image characteristics of the femoral head necrotic area; C, image characteristics after bone cement filling.

图1 CPI组骨水泥填充前后对比  
Fig.1 Comparison of the CPI group before and after cementing

样品用湿纱布包裹,实验前24 h室温(25 ℃)下自然解冻。在股骨头远端使用牙托粉包埋,固定在负重区垂直向上的位置,模拟人体中股骨头正常负荷方向。采用直径为10 mm的凹球形柱状钢进行压缩试验。压缩速率为2 mm/min。实验设备中的计算机自动记录加载信号,生成位移-负载曲线及相关数据<sup>[16]</sup>。根据位移-载荷曲线得到了极限应力和应变。该部分实验设备为力学加载机(美国MTS公司)。

### 1.5 统计学分析

采用SPSS 19.0软件进行统计分析,计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示,组间比较采用One-Way ANOVA检验,  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 4组一般资料比较

4组性别、股骨头Ficat分期比较均无统计学差异( $P > 0.05$ )。但TFF组年龄与其他3组相比,均有统计学差异( $P < 0.05$ )。见表1。

表1 各组研究对象一般资料  
Tab.1 Basic data of each group

Group	n	Sex		Age (year)	Staging		
		Male	Female		II	III	IV
TFF	8	4	4	68.3 ± 12.0	-	-	-
OFNH	8	4	4	55.7 ± 9.4 <sup>1)</sup>	0	7	1
CDBG	8	5	3	59.5 ± 10.5 <sup>1)</sup>	0	6	2
CPI	8	5	3	58.9 ± 8.5 <sup>1)</sup>	0	6	2

1)  $P < 0.05$  vs. TFF group.

### 2.2 股骨头骨微观结构

TFF组股骨头内部各区域骨小梁连续性完好,排列规则有序。中间区主压力骨小梁粗大、排列紧密,内侧区和外侧区骨小梁则相对薄弱(图2A)。坏死股骨头内部空间结构发生明显改变,内侧区及外侧区明显疏松化,坏死区骨小梁出现断裂,排列杂乱无序,坏死区周围出现硬化区,该处骨小梁排列无序、变粗(图2B)。显微CT分析结果显示,与TFF组对应的区域相比(图2C),ONFH组(图2D)中间区BV/TV、Tb.N、Tb.Th显著增高,BS/BV、Tb.Sp、Tb.Pf则显著降低( $P < 0.05$ )。见表2。

### 2.3 股骨头力学性能

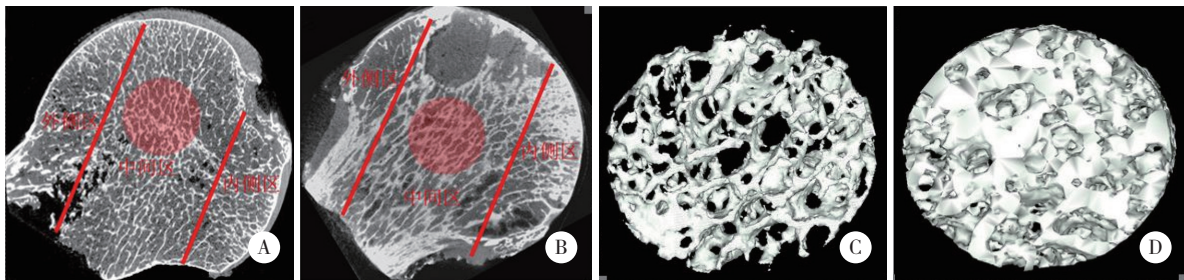
股骨头力学性能分析结果显示,OFNH组股骨头刚度较TFF组显著降低,CDBG组和CPI组股骨头刚度较ONFH组显著增加,但2组之间无明显差异。OFNH组股骨头最大载荷较TFF组显著降低,CPI组股骨头最大载荷较OFNH组显著增加,CPI组高于CDBG组,但是2组比较无统计学差异,见表3。

## 3 讨论

股骨头可分为中间区、外侧区和内侧区。中间区骨小梁因承担大部分作用于股骨头的负载,骨小

梁粗大、排列紧密、力学性能强,内侧区和外侧区骨小梁则相对薄弱<sup>[14]</sup>。本研究与以上结果一致,但坏死股骨头内部的空间结构发生明显改变。坏死股骨头内部骨小梁失去了规则有序的排列结构。Wolff定律强调骨结构和功能的统一,骨结构是其功能实现的基础,会随骨骼功能变化而发生调整。股骨

头内部空间结构的变化将导致股骨头力学性能的下降。BROWN等<sup>[16]</sup>认为ONFH发展过程中,股骨头内部应力重新分配,应力方向发生改变且出现应力集中。为了适应这种重新分配的压应力,坏死区底部骨小梁重塑,骨小梁增粗、呈各向异性排列。



A, spatial distribution of the trabecular bone in the TFF group; B, spatial distribution of the trabecular bone in the ONFH group; C, red portion of figure A; D, red shaded area of figure A.

图2 TFF组和ONFH组股骨头内部空间结构分布

Fig.2 Spatial distribution of the trabecular bone in the TFF and ONFH groups

表2 TFF组和ONFH组骨微观结构参数

Tab.2 Bone microstructure parameters in the TFF and ONFH groups

Parameters	TFF group	ONFH group
BV/TV (1)	0.396 ± 0.045	0.504 ± 0.097
BS/BV (1/mm)	18.543 ± 2.964	12.397 ± 2.323
Tb.Sp (mm)	0.269 ± 0.077	0.252 ± 0.058
Tb.N (1)	2.063 ± 0.387	3.477 ± 0.245
Tb.Th (mm)	0.076 ± 0.005	0.157 ± 0.035
TBPf (1/mm)	3.296 ± 1.329	0.940 ± 1.317

表3 各组股骨头刚度与最大载荷对比

Tab.3 Comparison of femoral head stiffness and maximum load between groups

Group	Stiffness (N/m)	Max load (N)
TFF	756.7 ± 117.6	1 795.9 ± 404.8
ONFH	423.4 ± 100.2 <sup>1)</sup>	840.9 ± 275.6 <sup>1)</sup>
CPI	697.0 ± 95.6 <sup>2)</sup>	1 641.8 ± 298.8 <sup>2)</sup>
CDGB	614.5 ± 99.8 <sup>1),2)</sup>	1 294.3 ± 278.7 <sup>1),2)</sup>

1)  $P < 0.05$  vs. TFF group; 2)  $P < 0.05$  vs. ONFH group.

目前仍然没有疗效确切的治疗方法来防止股骨头塌陷。当进展到Ficat IV期时,全髋关节置换术仍然是最常用的手术方式。然而,即使全髋关节置换术的假体设计和手术技术有所改进,仍不适用于年轻患者<sup>[4, 17-19]</sup>。因此,对于年轻患者治疗的最初目标应是防止软骨下骨塌陷,以保留股骨头。髓芯减

压植骨保髋治疗广泛应用于临床,可有效延缓股骨头塌陷,降低关节置换率<sup>[3]</sup>。但髓芯减压植骨后能否恢复股骨头的力学性能,目前尚不清楚。为了防止植骨区塌陷,临床传统做法是术后给予一段时间免负重。本研究也发现髓芯减压植骨后并不能恢复股骨头的力学性能。股骨头的刚度有所下降,术后

早期负重可能显著增加股骨头塌陷的风险,可能需要通过其他填充材料改善股骨头的力学性能。

骨水泥填充广泛应用于骨囊肿的填充中,可获得良好的力学支撑<sup>[10-11]</sup>。WOOD等<sup>[12]</sup>的研究显示在OFNHⅢ期切开复位骨水泥填充简单易行,术后效果良好。1项研究<sup>[20]</sup>以三维有限元方法分析骨水泥充填成人OFNH区域的力学变化,证实磷酸钙骨水泥是合适的填充材料。本研究结果显示,OFNH区骨水泥填充可显著增加负重区力学性能,降低股骨头塌陷的风险。骨水泥填充后,坏死区刚度和最大载荷能力增强。周建伟等<sup>[13]</sup>采用球囊扩张结合骨水泥填充OFNH区域,增强了股骨头的支撑能力,能够有效抵抗股骨头塌陷,可能避免股骨头进一步塌陷。这与本研究结果基本一致。患者术后不需要很长时间的免负重。

本研究存在一定的局限性,坏死股骨头标本多为疾病终末期标本,原因在于临床难以获得OFNH早期的样本。今后相关研究如果将OFNH早期样本纳入可能有更好的临床意义。

#### 参考文献:

- [1] GLIMCHER MJ, KENZORA JE. The biology of osteonecrosis of the human femoral head and its clinical implications. Ⅲ. Discussion of the etiology and genesis of the pathological sequelae; comments on treatment [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1979 (140): 273-312. DOI: 10.1097/00003086-197801000-00004
- [2] 陈雷雷, 何伟. 股骨头缺血性坏死相关生物力学研究进展 [J]. *中国骨伤*, 2011, 24 (2): 174-177. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2011.02.024.
- [3] 刘予豪, 周驰, 陈雷雷, 等. 基于股骨头坏死围塌陷期理论的保髓术式总结 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2017, 31 (8): 1010-1015. DOI: 10.7507/1002-1892.201611084.
- [4] LANDGRAEBER S, WARWAS S, CLAßEN T, et al. Modifications to advanced core decompression for treatment of avascular necrosis of the femoral head [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2017, 18 (1): 479. DOI: 10.1186/s12891-017-1811-y.
- [5] LARSON E, JONES LC, GOODMAN SB, et al. Early-stage osteonecrosis of the femoral head: where are we and where are we going in year 2018? [J]. *Int Orthop*, 2018, 42 (7): 1723-1728. DOI: 10.1007/s00264-018-3917-8.
- [6] ZHAO DW, CUI DP, LU FQ, et al. Combined vascularized iliac and greater trochanter graftings for reconstruction of the osteonecrosis femoral head with collapse: reports of three cases with 20 years follow-up [J]. *Microsurgery*, 2012, 32 (7): 546-551. DOI: 10.1002/micr.21995.
- [7] 梅荣成, 杨述华, 杨操, 等. 两种强化股骨头力学结构治疗股骨头坏死临床疗效比较 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2007, 15 (18): 1361-1363. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8478.2007.18.001.
- [8] 杨述华, 杨操, 李宝兴, 等. 强化力学结构治疗股骨头坏死的临床研究 [J]. *中华骨科杂志*, 2006, 26 (5): 313-316. DOI: 10.3760/j.issn:0253-2352.2006.05.006.
- [9] MAUREL B, LE CORROLLER T, BIERRY G, et al. Treatment of symptomatic para-articular intraosseous cysts by percutaneous injection of bone cement [J]. *Skeletal Radiol*, 2013, 42 (1): 43-48. DOI: 10.1007/s00256-012-1392-7.
- [10] FAHED R, CLARENÇON F, RIOUALLON G, et al. Just a drop of cement: a case of cervical spine bone aneurysmal cyst successfully treated by percutaneous injection of a small amount of polymethyl-methacrylate cement [J]. *J Neurointerv Surg*, 2016, 8 (1): e4. DOI: 10.1136/neurintsurg-2014-011541.rep.
- [11] 杨长远, 肖业生, 罗光平. 经皮穿刺骨水泥充填术治疗单纯性骨囊肿 [J]. *中国微创外科杂志*, 2005, 5 (12): 1031-1032. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6604.2005.12.030.
- [12] WOOD ML, MCDOWELL CM, KERSTETTER TL, et al. Open reduction and cementation for femoral head fracture secondary to avascular necrosis: preliminary report [J]. *Iowa Orthop J*, 2000, 20: 17-23.
- [13] 周建伟, 吴继功, 张美超, 等. 球囊扩张骨水泥填充治疗股骨头缺血性坏死的有限元分析和生物力学研究 [J]. *南方医科大学学报*, 2011, 31 (10): 1724-1728. DOI: 10.1186/1724-1728. DOI: 44-1627/R.20111004.1638.026.
- [14] FENG CL, WANG LZ, XU P, et al. Microstructural and mechanical evaluations of region segmentation methods in classifications of osteonecrosis [J]. *J Biomech*, 2021, 119: 110208. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2020.110208.
- [15] 王锐英. 缺血坏死股骨头负重区抗压强度生物力学分析 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2011, 19 (9): 750-753. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2011.09.15.
- [16] BROWN TD, HILD GL. Pre-collapse stress redistributions in femoral head osteonecrosis: a three-dimensional finite element analysis [J]. *J Biomech Eng*, 1983, 105 (2): 171-176. DOI: 10.1115/1.3138402.
- [17] 叶奕亨, 陈凯, 金可可, 等. 塌陷前期股骨头坏死的保头手术治疗的进展 [J]. *中国骨伤*, 2017, 30 (3): 287-292. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2017.03.021.
- [18] MONT MA, HUNGERFORD DS. Non-traumatic avascular necrosis of the femoral head [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1995, 77 (3): 459-474. DOI: 10.2106/00004623-199503000-00018.
- [19] HUNGERFORD DS, JONES LC. Asymptomatic osteonecrosis: should it be treated? [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2004 (429): 124-130.
- [20] 薛文, 王坤正, 凌伟. 以三维有限元方法分析骨水泥充填成人股骨头坏死区域的力学变化 [J]. *中国临床康复*, 2005, 9 (30): 109-111. DOI: 10.3321/j.issn:1673-8225.2005.30.037.

(编辑 于 溪)