

股骨成形术对于预防骨质疏松性髋部骨折的生物力学研究

武少坤¹, 鄢耀军¹, 顾志谦¹, 杨雷²

(1. 中国科学院大学宁波华美医院骨科, 浙江 宁波 315010 2. 温州医科大学附属第二医院育英儿童医院, 浙江 温州 325027)

【摘要】 目的:探讨股骨成形术是否可提高骨质疏松性股骨标本的抗骨折强度,进而可否预防髋部骨折;比较两种不同股骨成形方法对骨质疏松性股骨标本力学强度改变的差异,以明确成形术的最佳强化区域。**方法:**收集新鲜骨质疏松股骨标本 18 对,分为 A、B 两组,每组 9 对,并在每组中随机选取 9 具进行强化(A1 组,B1 组),相应的对侧标本作为对照组(A2 组,B2 组)。A1 组中强化标本强化的区域为股骨头、股骨颈、股骨粗隆、转子下区,B1 组中为股骨头、股骨颈、股骨粗隆区。记录骨水泥注入量并测量强化后股骨颈表面温度变化。对所有标本在模拟跌倒形态下进行生物力学测试,并记录载荷-位移曲线、标本的最终载荷,计算标本的最终能量及刚度值。比较强化组标本与相应对照组标本的生物力学差异以及两种不同强化方法对标本力学改变的差异。**结果:**相对于对照组,强化组标本最终载荷、最终能量均有明显提高,而刚度却无明显改变。经两种不同强化方法强化后的标本之间的最终载荷及最终能量差异无统计学意义。**结论:**股骨成形术具有微创、操作简捷、效果显著等优点,可作为预防骨质疏松性髋部骨折的新型手法方法推广应用。

【关键词】 髋; 骨质疏松性骨折; 生物物理学

中图分类号:R683.4

DOI:10.12200/j.issn.1003-0034.2020.06.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Biomechanical study on femoroplasty-augmentation for prevention of osteoporotic hip fractures WU Shao-kun, WU Yao-jun, GU Zhi-qian, and YANG Lei. Department of Orthopaedics, Huamei Hospital, University of Chinese Academy of Science, Ningbo 315010, Zhejiang, China

ABSTRACT Objective: To explore whether femoral plasty can improve the fracture resistance of osteoporotic femoral specimens and prevent hip fracture, and to compare the difference of mechanical strength changes between two different femoral plasty methods in osteoporotic femoral specimens, so as to determine the best strengthening area of the plasty. **Methods:** Eighteen pairs of fresh osteoporotic femur specimens were collected and divided into two groups, A and B, 9 pairs in each group. Nine fresh osteoporotic femur specimens in each group were randomly selected for enhancement, and the corresponding contralateral specimens were used as control group. In group A1, the enhancement areas were femoral head, femoral neck, femoral trochanter and subtrochanteric region. And in group B1, the enhancement areas were femoral head, femoral neck and femoral trochanter region. The amount of cement injected into the femoral neck was recorded and the surface temperature of the femoral neck was measured. All specimens were biomechanically tested under simulated falls. Load-displacement curves, final loads were recorded. The final energy and stiffness of specimens were calculated. The biomechanical differences between the specimens of the enhancement group and those of the corresponding control group were compared, and the mechanical changes of the specimens by two different enhancement methods were compared. **Results:** Compared with the control group, the ultimate load and energy of the specimens in the enhanced group increased significantly, but the stiffness did not change significantly. There was no significant difference in final load and energy between specimens strengthened by two different methods. **Conclusion:** Femoral plasty has the advantages of minimally invasive, simple operation and remarkable effect. It can be used as a new method to prevent osteoporotic hip fracture.

KEYWORDS Hip; Osteoporotic fractures; Biophysics

基金项目:宁波市华美基金(编号:2018HMKY17);温州市科技计划项目(编号:Y20110168)

Fund program: Huamei Fund of Ningbo(No. 2018HMKY17)

通讯作者:武少坤 E-mail:wushaokun04@126.com

Corresponding author: WU Shao-kun E-mail:wushaokun04@126.com

在老年骨质疏松性骨折中,以髋部骨折的致死率及致残率最高。即使行手术治疗的髋部骨折患者,1 年死亡率也高达 36%,且近一半的患者术后需辅助器械才能自由活动,部分患者则需永久的家庭护理^[1-2]。而髋部再次骨折死亡率更高。现行预防骨质

疏松性髌部(再)骨折的方法主要有:合理的锻炼,佩戴髌部保护装置^[3],以及服用相关的药物,如维生素 D、钙、双磷酸盐类、降钙素等^[4]。然而药物治疗起效慢,且有不良反应及长期服用依从性差、髌部保护器价格昂贵、使用不方便、作用不确切等缺陷,这些均限制了在临床上的有效应用。股骨成形术,即通过微创的方法,向骨质疏松易骨折的髌部注射强化剂,以增大其抗骨折强度,从而降低骨折风险系数,具有快速、简易、安全、持久等优点,是预防髌部骨折的新型手术方法^[5]。本研究旨在明确股骨成形术是否可显著提高髌部标本的抗骨折强度,进而预防跌倒导致的髌部骨折,以及强化成形时强化剂注射的最佳区域。

1 材料与方法

1.1 试验材料

共收集新鲜老年双侧股骨近端尸体标本 19 对,肉眼及行正侧位 X 线检查,排除患有风湿、结核、肿瘤等病变标本 1 对,共剩余老年双侧股骨近端尸体标本 18 对(其中女 11 对,男 7 对)。自股骨大转子尖以远 18 cm 处切除股骨内外髌,并去除附着软组织,再以生理盐水纱布包裹各具标本,双层塑料袋密封保湿,放置于-30℃冰箱中待用。试验前仍保持标本密封保湿,室温解冻 24 h。

1.2 分组

根据强化部位不同,使用随机数字表法将 18 对标本分为 A、B 两组,每组 9 对(18 具),标记好左右侧。在 A 组中再随机选择 9 具标本进行骨水泥强化成形(强化组 A1),相应的对侧 9 具为空白对照组(对照组 A2);同法处理 B 组标本(强化组 B1,对照组 B2)。其中强化组 A1 标本强化部位为股骨头、股

骨颈、股骨粗隆、转子下区(强化区域 1),强化组 B1 标本强化部位为股骨头、股骨颈、股骨粗隆区(强化区域 2)。

1.3 观察项目与方法

1.3.1 股骨近端结构相关参数及骨密度测量 测量每具标本的股骨颈直径、颈干角、股骨颈长 3 项结构参数。每项参数测量 3 次,取结果的平均值(表 1)。采用美国 GE Lunar 双能 X 线骨密度仪对所有试验标本进行骨密度检测。测量前将标本放置于 15 cm 的深水中,以减少缺失的软组织对骨密度测量结果的影响,并测量股骨颈、大粗隆、Wards 三角及髌部整体骨密度(表 1)。测量结果以髌部整体骨密度测量绝对值为标准,即 $<0.75 \text{ g/cm}^2$ 为骨质疏松标本, $0.75 \sim 0.95 \text{ g/cm}^2$ 为骨量减少范围。

1.3.2 股骨强化成形及成形术后温度的测量 在股骨强化成形前,先于强化部位钻孔,即在 C 形臂 X 线透视(荷兰 Philips)引导下,使用 4.5 mm 斯氏针,以股骨颈中轴线与转子间区外侧骨皮质交点为进针点,沿股骨颈轴线进行钻孔,钻至股骨头软骨面下 10 mm 处为止。再将直径为 4.5 mm 的空心套管针(美国 Manane Trapsysteme)插入预先打洞的标本中,将 LINK 骨水泥粉及单体混合、调配,并迅速转载至 20 ml 一次性注射器中,在 C 形臂 X 线透视机的引导下将骨水泥注入预强化部位,并记录骨水泥注入量(图 1)。完成强化操作后,采用非接触红外测温仪分别对强化标本的股骨颈前外、后外侧骨皮质表面温度进行测量。自强化后骨皮质表面温度开始上升时起测,测量频率为每次 1 min,当股骨颈骨皮质表面温度恢复到室温时,温度监测结束。

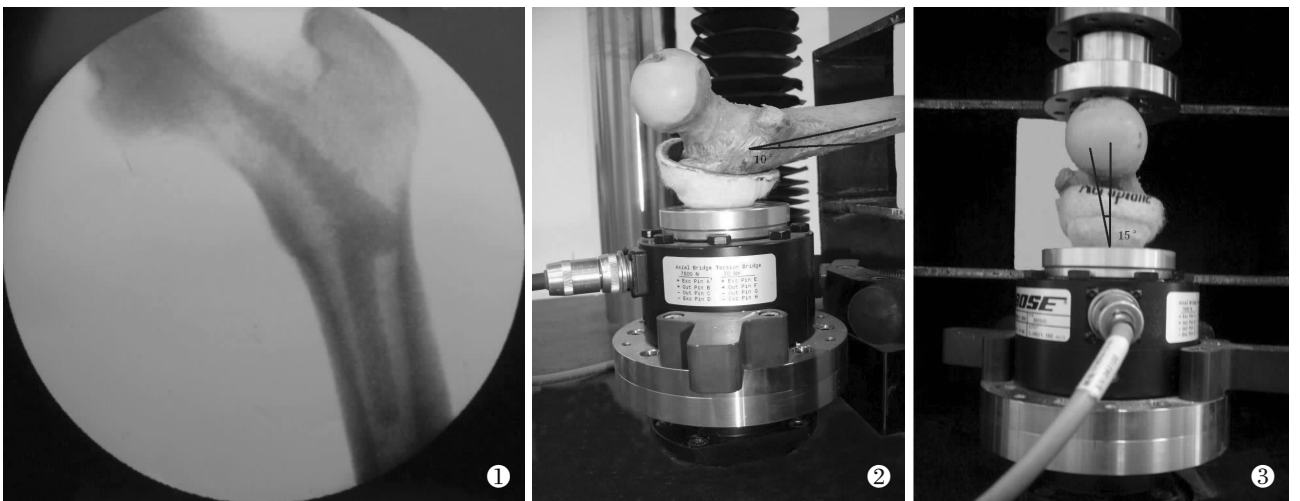


图 1 标本强化后透视表现 图 2 模拟跌倒受力模型,即股骨大转子着地,股骨内旋 15°,股骨干长轴与水平面成 10° 图 3 生物力学测试机及标本测力状态

Fig.1 Radiological appearance of augmented femora Fig.2 Simulating a fall on the greater trochanter,specimens were positioned 15° internally rotated and 10° from the horizontal plane Fig.3 Biomechanical testing set-up with positioning of the femora in the material testing machine

1.3.3 模拟跌倒生物力学测试 使用义齿基托聚合物包埋所有股骨标本远端, 将包埋标本固定到夹具上, 同时调节标本, 使股骨大转子落位于生物力学测试机(美国 Bose)的压力-位移感应座上。测力前标本的位置恰为模拟人体跌倒着地时的姿势, 即股骨大转子为着力点, 股骨内旋 15°, 股骨干长轴与水平面成 10°(图 2)。通过压力杆, 于股骨头上预加载 40 N 垂直应力, 以消除弹性蠕变, 压力杆再以 100 mm/s 位移垂直加载应力, 直至发生骨折(图 3), 生物力学机连接电脑自动记录载荷-位移曲线(图 4)。完成力学测试后, 所有标本再次行 X 线扫描, 以记录骨折位置。骨折类型以骨科创伤协会系统^[6]的骨折分类(头下型骨折、经颈型骨折、转子间骨折、转子下骨折)进行评定。

1.4 统计学处理

采用 SPSS 19.0 统计软件对所有测量结果先做正态性检验, 以确定统计处理方法。符合正态性分布的结果, 采用配对设计定量资料的 *t* 检验比较组内强化组与对照组的骨密度、结构参数、最终载荷、最终能量及刚度; 成组设计定量资料的 *t* 检验比较不同强化组间(强化组 A1、强化组 B1)强化标本的骨密度、结构参数、最终载荷及最终能量的差异。骨折位置与骨强度、刚度之间的关联采用多项 Logistic 回归分析。所有定量资料采用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 骨水泥注射量及温度测定结果

骨水泥注射量 7~18 ml, A1、B1 组骨水泥注射量分别为 (15.00±3.74) ml, (13.00±3.55) ml, 两组差异无统计学意义($t=0.261, P>0.05$)。股骨颈前外侧温度上升 2.3~4.5 °C, 股骨颈后外侧温度上升 2.5~4.4 °C。

2.2 骨折类型

经强化的标本骨折分型: 经颈型骨折 6 具, 转子间骨折 10 具, 转子下骨折 2 具; 未经强化的标本骨

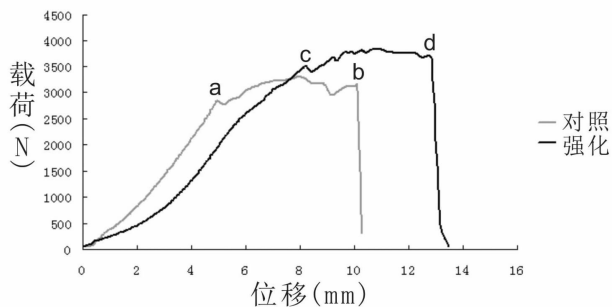


图 4 典型载荷-位移曲线图, a、c 点对应的载荷数值分别为对照组与强化组的屈服载荷, b、d 点所对应的载荷数值为标本所能承受的最终载荷

Fig.4 Representative force-versus-displacement plot. Data shown are yield (c) and ultimate (d) loads for the femoroplasty specimens, and yield (a) and ultimate (b) loads for the control specimens

折分型: 头下型骨折 2 具, 经颈型骨折 7 具, 转子间骨折 8 具, 转子下骨折 1 具。

2.3 生物力学测定结果

强化组与对照组间、不同强化组间骨密度及股骨近端结构参数比较差异无统计学意义(表 1), 强化后标本的最终载荷与最终能量与未强化标本比较均明显增高, 而强化后刚度未见明显变化(表 1)。而经两种不同强化方法强化后的标本之间的最终载荷及最终能量差异无统计学意义($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 股骨成形术可行性及有效性分析

本研究证实了对髌部不同区域进行预防强化的可行性, 且强化成形后标本的抗骨折强度明显提高。Roberts 等^[7]研究发现在跌倒时外界对髌部的冲击力可达 6 000~7 000 N, 骨质疏松的老年髌部远远耐受不了如此高的外力。然而, Greenspan 等^[8]调查显示在所有发生跌倒的老年群体中, 髌部骨折发生率却不足 5%。Roberts 等^[7]进一步研究发现跌倒时外界对髌部的冲击力与患者的身高、体重、跌倒着地的方向

表 1 不同强化组与对照组生物力学测定结果比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.1 Comparison of biomechanical results among different groups($\bar{x} \pm s$)

组别	标本数	股骨颈长度(mm)	颈干角(°)	骨密度(g/cm ³)	最终载荷(N)	最终能量(Nm)	刚度(kN/m)
强化组 A1	9	95.700±1.622	126.000±2.345	0.660±0.064	3 835.2±123.4	41.0±2.4	735.6±36.6
对照组 A2	9	95.700±1.360 ^{a1}	126.000±2.233 ^{a2}	0.670±0.066 ^{a3}	2 971.6±151.1 ^{a4}	19.7±1.7 ^{a5}	736.3±32.1 ^{a6}
强化组 B1	9	95.700±1.346	126.000±1.091	0.670±0.064	3 834.2±193.4	42.3±3.1	744.1±40.5
对照组 B2	9	95.700±1.386 ^{a7}	126.000±0.961 ^{a8}	0.660±0.073 ^{a9}	2 930.2±244.5 ^{a10}	21.0±2.3 ^{a11}	744.8±37.6 ^{a12}

注: 与强化组比较, ^{a1} $t=-0.018, P=0.986$; ^{a2} $t=-1.729, P=0.122$; ^{a3} $t=1.387, P=0.203$; ^{a4} $t=-45.125, P=0.000$; ^{a5} $t=-81.737, P=0.000$; ^{a6} $t=0.248, P=0.810$; ^{a7} $t=-0.087, P=0.933$; ^{a8} $t=-0.233, P=0.822$; ^{a9} $t=-1.007, P=0.344$; ^{a10} $t=-21.930, P=0.000$; ^{a11} $t=-70.516, P=0.000$; ^{a12} $t=0.166, P=0.872$

Note: Comparison with strength group, ^{a1} $t=-0.018, P=0.986$; ^{a2} $t=-1.729, P=0.122$; ^{a3} $t=1.387, P=0.203$; ^{a4} $t=-45.125, P=0.000$; ^{a5} $t=-81.737, P=0.000$; ^{a6} $t=0.248, P=0.810$; ^{a7} $t=-0.087, P=0.933$; ^{a8} $t=-0.233, P=0.822$; ^{a9} $t=-1.007, P=0.344$; ^{a10} $t=-21.930, P=0.000$; ^{a11} $t=-70.516, P=0.000$; ^{a12} $t=0.166, P=0.872$

姿势等因素有关,而人体自身骨骼及髌部软组织是抵制外界冲击力的主要屏障。因此,外界冲击力能否穿透该屏障,才是骨折与否的决定点。本研究结果显示强化后标本的抗骨折强度明显提高,标本承受的最终载荷可增高 29.1%,标本承受的最终能量最高可提升 108.1%。由此可见,股骨成形术无疑明显增强了髌部抵抗外界冲击力的屏障,从而降低了髌部骨折的风险。

对不同区域进行组合强化是根据股骨近端不同解剖形态及临床上股骨近端常见的骨折类型而设计的,研究发现两种不同强化方法对标本的力学改变并无明显差异,且骨水泥产热温差亦无明显差别。除欲明确强化是否会提高骨质疏松股骨抗骨折强度及不同强化方法之间的利弊,本试验另一个关注点是强化后的股骨发生骨折的位置是否会集中于骨水泥边缘。如对股骨头、股骨颈、粗隆间区强化后的标本骨折位置多偏向于粗隆下区,然而试验结果并未发现这一结论。但本研究标本有限,尚需扩大样本。

3.2 股骨成形术及力学测定方法的探讨

为减少骨水泥栓塞的发生率,本试验采取了先钻孔开设强化通道,后注入强化剂的方法,本方法同时也明显减少了骨水泥的使用量。在本试验中,红外温度仪测定到注射强化剂后股骨颈前后外侧骨皮质表面温度最高上升 4.5℃,明显低于 Eini 等^[9]报道的 36 ml 骨水泥注射带来的 22.1℃ 的温度攀升。Eini 等^[9]同时指出,在体外如股骨近端骨皮质表面温度上升 29℃,在人体内骨表面温度可达到 60℃,将直接导致骨膜、骨膜内血管的热性坏死,而引起股骨的坏死。可见在不削弱骨强度的前提下,减少骨水泥的使用量,无疑会减少热反应损伤,降低栓塞发生率,也有利于骨折后的手术翻修。

本研究在进行生物力学测定时,采取的是股骨大转子着地,股骨颈内旋 15°,股骨干长轴与水平面成 10°的经典模拟跌倒测力模型。然而,人体在跌倒时,除了跌倒的方向会导致股骨骨折与否,跌倒着落的速度也会影响到髌部的受力状况^[10]。不同于以前 2 mm/s 的静态施力,本试验采取 100 mm/s 的动态位移施压。自压力杆与股骨头上端接触,并以 100 mm/s 的位移下降到股骨发生骨折,大约用时 30 ms,恰与 Robinovitch 等^[11]报道的人体从跌倒到大粗隆着地所需时间相符。因此,100 mm/s 的位移结合股骨颈内旋 15°、股骨干长轴与水平面成 10°角的特定模型,才是模拟人体跌倒的最佳生物力学模型。

综上所述,股骨成形术简洁易操作、创伤小,不失为一种快速、简易、微创的预防老年人髌部(再)骨折的新型手术方法。而骨质疏松性髌部骨折,无疑是老年人身体健康指数急剧下降的转折点^[12],基于高额老年人口比例,迫切需要一种有效的方法来预防骨质疏松疾病导致的这一严重并发症,而股骨成形术必将有其广泛的适用空间。

参考文献

- [1] Mohd-Tahir NA, Li SC. Economic burden of osteoporosis-related hip fracture in Asia: a systematic review[J]. *Osteoporos Int*, 2017, 28(7): 2035-2044.
- [2] Harvey L, Toson B, Mitchell R, et al. Incidence, timing and impact of comorbidity on second hip fracture: a population-based study[J]. *ANZ J Surg*, 2018, 88(6): 577-581.
- [3] Song Y, Zhang T, Wang Z. Study on buffer characteristics of air cushion used as hip protector[J]. *J Appl Biomater Funct Mater*, 2018, 16(1): 32-36.
- [4] Vandenbroucke A, Luyten FP, Flamaing J, et al. Pharmacological treatment of osteoporosis in the oldest old[J]. *Clin Interv Aging*, 2017, 6(12): 1065-1077.
- [5] Ramos-Infante SJ, Ten-Esteve A, Alberich-Bayarri A, et al. Discrete particle model for cement infiltration within open-cell structures: prevention of osteoporotic fracture[J]. *PLoS One*, 2018, 13(6): e0199035.
- [6] Fracture and Dislocation Compendium. Orthopaedic Trauma Association Committee for Coding and Classification[J]. *J Orthop Trauma*, 1996, 10(Suppl 1): v-ix, 1-154.
- [7] Roberts BJ, Thrall E, Muller JA, et al. Comparison of hip fracture risk prediction by femoral aBMD to experimentally measured factor of risk[J]. *Bone*, 2010, 46(3): 742-746.
- [8] Greenspan SL, Myers ER, Maitland LA, et al. Fall severity and bone mineral density as risk factors for hip fracture in ambulatory elderly[J]. *JAMA*, 1994, 271(2): 128-133.
- [9] Eini PF, Franz T, Fankhauser C, et al. Femoroplasty-augmentation of mechanical properties in the osteoporotic proximal femur: a biomechanical investigation of PMMA reinforcement in cadaver bones[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2004, 19(5): 506-512.
- [10] Courtney AC, Wachtel EF, Myers ER, et al. Effects of loading rate on strength of the proximal femur[J]. *Calcif Tissue Int*, 1994, 55(1): 53-58.
- [11] Robinovitch SN, Hayes WC, McMahon TA. Prediction of femoral impact forces in falls on the hip[J]. *J Biomech Eng*, 1991, 113(4): 366-374.
- [12] 李庆庆, 桂先革, 蒋增辉, 等. 老年股骨转子间骨折髓内钉内固定术后功能恢复危险因素分析[J]. *中国骨伤*, 2018, 31(5): 408-412.

LI QQ, GUI XG, JIANG ZH, et al. Analysis on risk factors of functional recovery after intramedullary nail fixation for femoral intertrochanteric fractures in elderly patients[J]. *Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma*, 2018, 31(5): 408-412.

(收稿日期: 2019-06-20 本文编辑: 连智华)