

高海拔地区股骨颈骨折空心螺钉斜三角与倒三角构型的三维有限元对比研究

张学斌 雷凯 任荣 李得春 王小平 白景棠 齐园园 王哲 刘熹

【摘要】 目的 应用三维有限元技术对比分析高海拔地区股骨颈骨折空心螺钉两种构型的稳定性。方法 获取1例正常股骨颈的CT图像,使用3-matic Research 13.0制备股骨颈骨折模型,分别建立了股骨颈骨折空心螺钉斜三角构型和倒三角构型的有限元模型。对有限元模型分别进行500 N, 1 000 N, 1 500 N, 2 100 N的载荷,观察记录股骨及空心螺钉应力和位移变化情况。结果 相同载荷下,斜三角构型的各螺钉最大位移、最大VonMises应力均小于倒三角构型的螺钉;斜三角构型股骨头应力集中的范围要小于倒三角构型;两种模型中斜三角构型的股骨整体最大位移均小于倒三角构型;斜三角构型中股骨整体最大VonMises应力高于倒三角构型。结论 相同载荷下,斜三角构型更符合股骨颈正常解剖特点,各个螺钉所受的应力分布更为合理,对骨折的固定更为坚强,更能有效避免术后内固定断裂失败、内固定切出等并发症的发生。

【关键词】 股骨颈骨折; 空心螺钉; 斜三角; 倒三角; 三维有限元

Oblique triangle and inverted triangle configurations of cannulated screws for femoral neck fractures in high altitude population: a three-dimensional finite element comparative study Zhang Xuebin, Lei Kai, Ren Rong, Li Dechun, Wang Xiaoping, Bai Jingtang, Qi Yuanyuan, Wang Zhe, Liu Xi. Department of Orthopedics, Qinghai University Affiliated Hospital, Xining 810000, Qinghai, China

Corresponding author: Zhang xuebin, Email: xuebin_1982@126.com

【Abstract】 Objective To compare the stability of two types of cannulated screws for femoral neck fracture in high altitude area with three-dimensional finite element technique. **Methods** CT images of 1 normal femoral neck were obtained and the femoral neck fracture model was prepared by 3-Matic Research 13.0. The finite element models of oblique triangle and inverted triangle of hollow screw were established respectively. The finite element models were loaded at 500 N, 1 000 N, 1 500 N and 2 100 N, respectively. The Von Mises peak stress and displacement of cannulated screws and the stress distribution of femoral head were observed and recorded. **Results** Under the same load, the maximum displacement and the maximum VonMises stress of the screw with oblique triangle configuration is smaller than that of the screw with inverted triangle configuration. The stress concentration range of femoral head in oblique triangle configuration was smaller than that in inverted triangle configuration. The overall maximum displacement of femur in oblique triangle configuration was less than that in inverted triangle configuration. The maximum VonMises stress of femur in oblique triangle was higher than that in inverted triangle. **Conclusions** Under the same load, compared with the traditional inverted triangle configuration, the oblique triangle configuration is more consistent with the normal anatomical characteristics of femoral neck, the stress distribution of each screw is more reasonable, the fixation of fracture is stronger, and it can effectively avoid the occurrence of complications such as fracture failure and internal fixation cutting out.

【Key words】 Femoral neck fracture; Cannulated screw; Oblique triangle; Inverted triangle; Three-dimensional finite element

DOI: 10.3877/cma.j.issn.2096-0263.2022.04.003

基金项目: 青海省科学技术厅应用基础研究项目(2019-ZJ-7095)

作者单位: 西宁 810000, 青海大学附属医院骨科

通信作者: 张学斌, Email: xuebin_1982@126.com

股骨颈骨折是骨科临床较为常见的骨折种类,大多数病例为老年人,由于年纪的增高,骨量的流失使得骨的脆性增高,韧性降低,从而发生率也增高^[1],大多由低能量的损伤所致,且女性多于男性^[2]。近年来,随着科学技术的日益发展,高能量损伤所致的年轻股骨颈骨折患者也逐渐增多,并且所受能量越高骨折块越容易发生移位^[3]。股骨颈内固定种类繁多,空心加压螺钉(cannulated compression screws, CCS)无疑仍是目前最常用的治疗年轻股骨颈骨折患者的固定方法,但是其置钉方式的选择仍饱受争议。笔者认为股骨颈的解剖形态决定了空心螺钉的植入方式及构型。临床上股骨颈骨折空心螺钉构型应符合股骨颈正常解剖形态特点,只有这样才能达到更稳定的固定效果。同时,因生存环境及生存习惯的不同,不同国家、不同种族、不同地域人群股骨颈的解剖形态也会存在着一定差异。我们之前的一项关于高海拔地区股骨颈结构的研究表明,股骨颈后上方是一斜面,不是圆滑的曲面,所以股骨颈骨折空心螺钉的最佳置钉方式应该是斜三角构型,应用3枚空心螺钉固定股骨颈骨折时,前方螺钉尽量贴近前侧及上侧皮质,在正位上后方螺钉要低于前方螺钉,这样才能达到尽量贴近后侧皮质同时又有有效的避免后方螺钉由后上斜面穿出。为了进一步研究探讨斜三角构型置钉是否在稳定性和抗剪切力等方面优于倒三角构型,笔者对两种构型进行了三维有限元对比分析,现汇报如下。

资料与方法

一、纳入、排除标准及一般资料

纳入标准为:(1)年龄18~65岁,性别不限;(2)长期生活在高海拔地区;(3)理解本研究,并自愿参加者。

排除标准为:(1)有股骨颈陈旧或新鲜骨折;(2)风湿或类风湿、先天性髋关节发育不良、骨肿瘤等骨病患者;(3)怀孕及哺乳期妇女;(4)下肢功能障碍者。

筛选出符合标准的1名志愿者,男性,32岁,体重76 kg,身高180 cm。采用Brilliance iCT型256层螺旋CT对志愿者进行左侧股骨颈薄层扫描,留取DICOM格式的数据资料。本研究已经青海大学附属医院伦理委员会批准,伦理审批号为P-SL-2019051,所有志愿者均提供了知情同意书。

二、方法

将获得的志愿者的Dicom格式文件导入Mim-

ics Research 21软件(比利时Materialise公司),重建三维模型。标记股骨颈的中轴线:通过轮廓线(Polylines)命令生成模型轮廓线,依据股骨头轮廓线生成一个球体,取球心坐标为A点,再取中心线(Fit Centerline),通过对两条中心线的交点做标记,记为B点,该点即为股骨颈与股骨干的中心线交点,过A和B两点作一条直线(Draw Line),此线就是股骨颈的中轴线(图1),保存此文件。应用3-matic Research 13.0(比利时Materialise公司)打开上述文件,使用切割命令(Cut)以垂直于中轴线的方向对股骨颈作厚度为2 mm的切割在股骨颈中段进行完全切割,选取股骨颈中段切割线作为股骨颈骨折线,模拟股骨颈骨折,该骨折模型被定义为我们研究的股骨颈骨折模型(图2)。确定股骨颈骨折模型中空

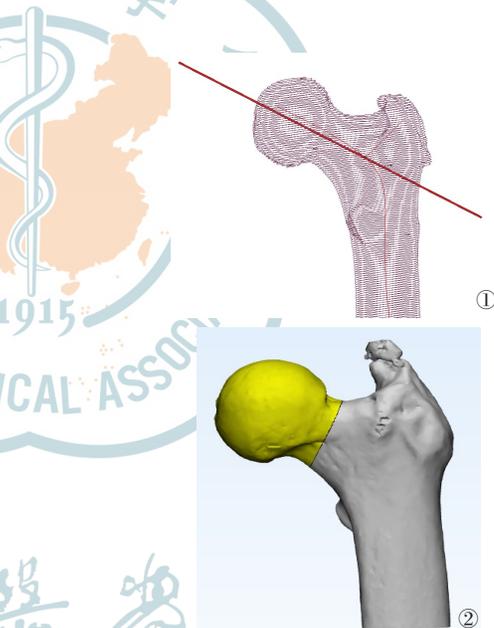


图1 确定股骨颈中轴线

图2 股骨颈骨折模型

钉不同构型的置钉点。由于股骨颈并非规则的三棱柱或四棱柱形,而是近端以三棱柱为主,向远端逐渐移行为四棱柱形的不规则形状。因此,股骨颈的最窄平面并非一处。将模型调至中轴线与操作窗口垂直的方向,通过测量比对,寻找到最窄的两处平面,并将最上层的平面的透明度调至中度透明(middle),隐藏其余无关平面。此时这两个平面重叠区域则为股骨颈最窄处,我们认为当3枚空心螺钉在这个两个最窄平面重合区域安全通过时,那么在其他层面3枚螺钉也必然不会穿出皮质,才能对骨折形成有效的固定。根据两个最窄侧面重合部分的图形,我们确定两种不同构型的置钉位置,我们选取置钉位

置严格遵循股骨颈骨折空心钉治疗原则,分别采用斜三角与倒三角的布钉方式进行模拟置钉(图3)。倒三角实行倒“品”字的等边三角形布钉结构。斜三角三枚螺钉选取标准为:①前上螺钉置入点,尽量靠近前上侧皮质②后侧螺钉置入点,尽量靠近后侧皮质;③下方螺钉置入点,居中尽量靠近下侧皮质,起到皮质支撑作用。两种构型中所有螺钉均平行于股骨颈中轴线置钉。在Abaqus6.14-1软件(美国达索SIMULIA公司)中进行应力和位移的变化分析,此时认为骨骼是均匀的,且具有每个方向同性的线性弹性特点^[4-6]。泊松比(Poisson's ratio, PR)和弹性模量的数值见于表1。空心螺钉模型采用Ti-6AL-4V钛合金结构设计,利用四面体10节点单元(C3D10M)对有限元模型完成了网格化划分,股骨277 741个节点,皮质骨29 869个线性四面体单元,松质骨181 350个线性四面体单元;前上空心螺钉35 870个节点,22 532个线性四面体单元;后方空心螺钉35 214个节点,21 974个线性四面体单元;下方空心螺钉41 033个节点,25 875个线性四面体单元。在整个模拟过程中,重力的影响被认为是可以忽略不计的。骨与螺钉之间以及骨块之间都存在摩擦。空心螺钉的螺纹表面被认为是连接约束。骨与

表1 研究所涉及的材料性质图4 2 100 N载荷下螺钉位移变化的应力云图(a:斜三角置钉方式;b:倒三角置钉方式)

结构	弹性模量(GPa)	泊松比
Ti-6AL-4V	105	0.35
皮质骨	16.80	0.30
松质骨	0.84	0.20

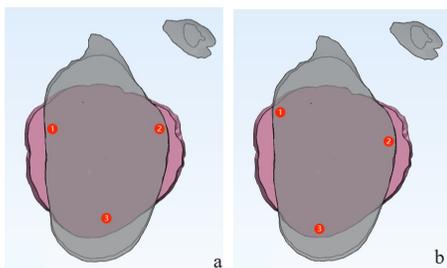


图3 计算机模拟置钉(a.采用倒三角的置钉方式b.采用斜三角的置钉方式)

螺钉之间的摩擦系数(friction factor, FF)取0.3,骨块之间的FF取0.46^[7],股骨表面远端受到零自由度的约束。对有限元模型分别进行500 N,1 000 N,1 500 N,2 100 N的载荷,最高相当于300%的体重,模拟术后

患肢逐步负重的过程。记录空心螺钉的Von Mises峰值应力及位移变化,以及股骨头、股骨整体的应力分布情况。

结 果

一、空心螺钉位移变化

在有限元模型中,螺钉的最大位移均处于螺钉尖部,随施加压力的增加而增加。同一载荷下,斜三角构型的各螺钉最大位移均小于倒三角构型的各螺钉(图4),能获得更好的稳定性(表2)。

二、空心螺钉应力大小情况

在有限元模型中,倒三角构型3枚空心拉力螺钉的最大Von Mises应力都略大于斜三角构型;每根螺钉最大Von Mises应力都集中在骨折断裂处,其中上方两根螺钉应力聚集的较明显(图5)。螺钉应力峰值分布见图6。

三、股骨头应力分布情况

股骨头部位应力分布整体倾向向下侧,应力峰值在近骨折线处,说明螺钉在抗剪切中起到重要作用。同一载荷下,斜三角构型股骨头应力集中的范围要小于倒三角构型(图7),但是股骨头部位Von Mises峰值应力无明显差别(图8)。

四、股骨整体位移变化

在骨折模型中,加载后最大位移出现在股骨头最上端,并且随着施加重力的增加而增加。同一载荷下,斜三角构型的整体最大位移均小于倒三角构型,斜三角构型对股骨颈骨折具有更好的固定作用(图9,10)。

五、股骨整体应力分布

骨折模型中应力峰值均集中于股骨内侧与内固定接触的位置、股骨近端内侧近小转子附近,模型的应力分布见图11~12。同一载荷下,斜三角构型中

表2 不同外力下螺钉最大位移分布(单位:mm)

	500 N	1 000 N	1 500 N	2 100 N	
斜三角	①	2.23	4.94	8.24	13.35
	②	2.23	4.94	8.24	13.35
	③	2.14	4.74	7.93	12.87
倒三角	①	2.39	5.29	8.86	14.39
	②	2.39	5.29	8.86	14.39
	③	2.3	5.09	8.53	13.87

注:①②③分别为前上、后上、远端三枚螺钉

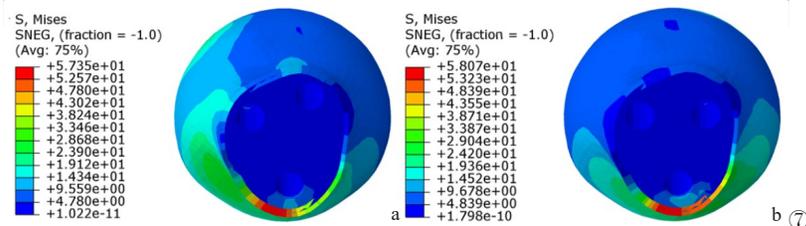
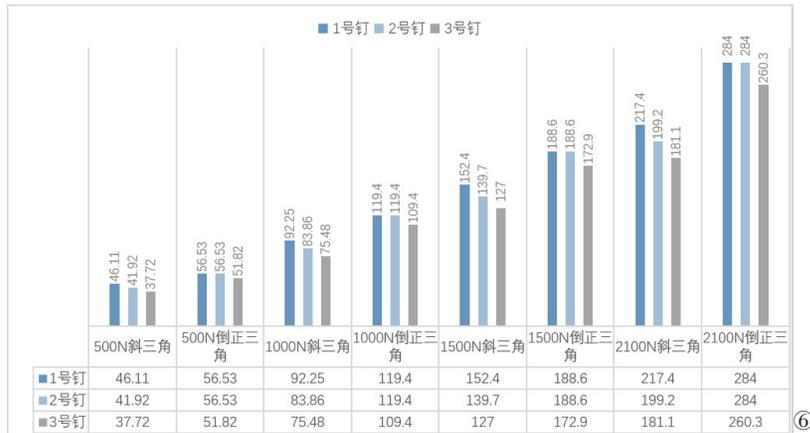
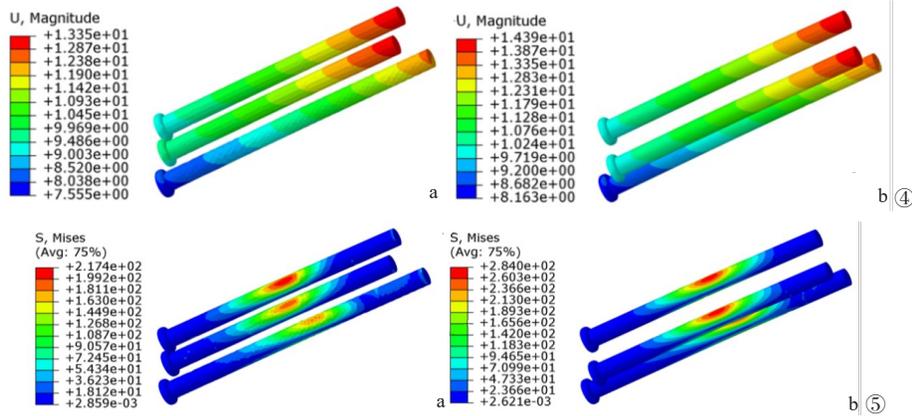


图4 2100N载荷下螺钉位移变化的应力云图(a:斜三角置钉方式;b:倒三角置钉方式) 图5 2100N 力下螺钉应力云图(a:斜三角构型;b:倒三角构型) 图6 螺钉应力峰值分布(单位:Mpa) 图7 2100N 力下股骨头应力分布(a:斜三角构型;b:倒三角构型)

股骨整体最大 Von Mises 应力相对于倒三角构型更大,因此空心螺钉所承受的应力就更小,说明对于骨折的固定更坚强。而在倒三角构型中空螺钉所受的应力相对更大,更容易出现内固定断裂、失败等并发症。

床上对于65岁以上移位的股骨颈骨折患者,一般建议行人工髋关节置换术,包括全髋关节置换术和股骨头置换术,如果患者条件允许,建议尽可能行全髋关节置换术,其在并发症发生率以及髋关节的功能方面都优于人工股骨头置换术^[10]。此外,有研究表

讨 论

股骨颈骨折是临床上比较多发的骨折类型,占周身总骨折的3.6%,占髋部骨折的50%^[8]。据估算,到本世纪中叶全球股骨颈骨折的发病总数将会超过6300万,这将对社会、家庭、医疗机构等造成十分巨大的压力。在美国每年用于救治股骨颈骨折患者的预算超过百亿美元^[9],对于我国这样一个人口众多的发展中国家来讲,更是一笔不菲的支出。目前临

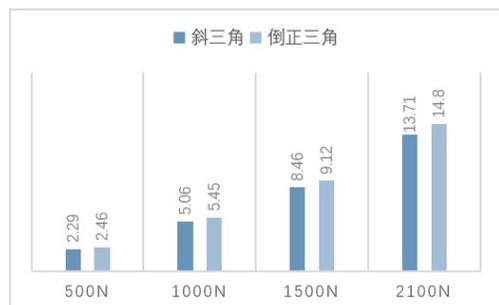


图8 不同外力下股骨头应力峰值变化(单位:Mpa)

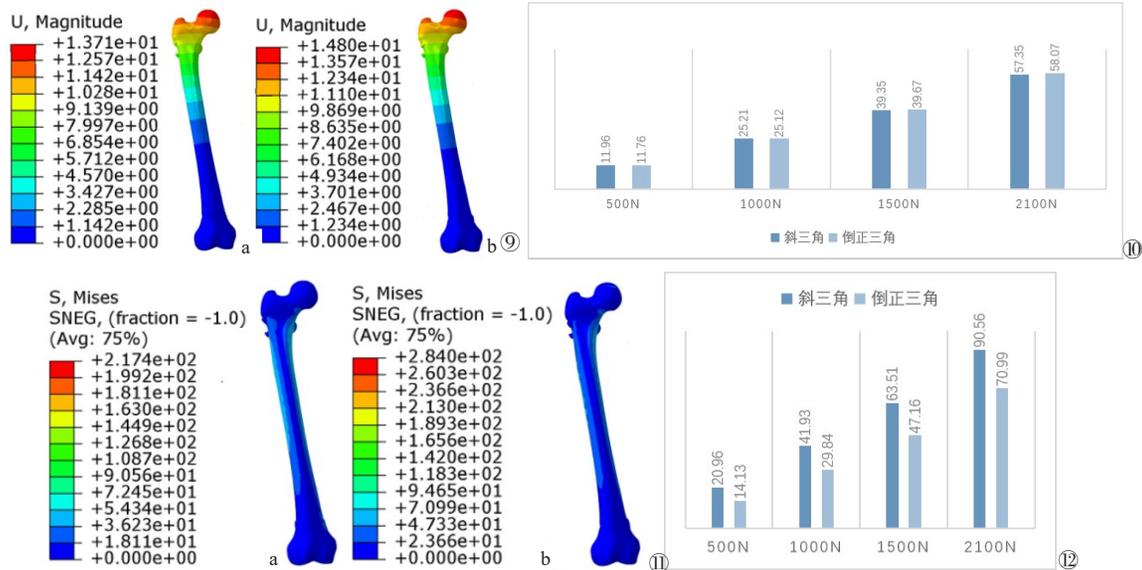


图9 2100 N力下股骨整体位移变化(a:斜三角构型;b:倒三角构型) 图10 不同外力下股骨整体位移变化(单位:mm) 图11 2100 N力下股骨整体应力分布(单位:Mpa) 图12 不同外力下股骨整体应力分布变化(单位:Mpa)

明^[11],经皮空心钉固定依然推荐作为老年股骨颈骨折的治疗方式,也可以取得较好的疗效。对于年龄<65岁的青中年患者,建议行内固定治疗,内固定方式众多且各具优缺点,临床上应该做到最优化^[12]。其适应证如下:①稳定的股骨颈骨折(Garden I、II型);②年龄低于65岁的不稳定骨折;③年龄过大,基础疾病较多、不能经受关节置换手术的患者。在多种内固定方式当中,CCS仍然是目前应用最广泛^[13]、实用、简单的内固定方式。它由三颗平行空心螺钉组成,采用倒置三角形结构固定,可承受相对较高的剪切力,并提供抗弯曲性和抗扭转强度。螺钉的位置、置入角度、钻孔次数均能影响股骨颈骨折固定的成效^[14]。其手术时间短,术中出血少,对软组织损伤小,操作难度小;在固定效果上较稳定,术后能早期下床活动,有助于骨折的愈合。

临床上使用空心螺钉治疗股骨颈骨折时,3枚空心螺钉固定仍是目前最多见的股骨颈骨折的固定方法。近几年来,关于3枚空心加压钉与人工髋关节置换在治疗股骨颈骨折疗效上的对比研究逐渐增多^[15-16],而三枚空心加压钉多种方法的技术革新,逐步降低了内固定失败率、骨折不愈合率以及股骨头坏死率,从而提高了内固定治疗股骨颈骨折的治愈率^[17]。随着计算机数字骨科领域的快速发展,更多的股骨颈骨折置钉构型被提出和运用。有学者对正三角形、倒三角形、前三角形、后三角形和垂直形五种置钉方式进行对比研究之后指出,螺钉的最大

应力分布在螺钉的中间部位,我们的研究结果也印证了这一点。同时倒置三角形的布钉方式能够更好的承担应力,正三角是最不推荐的置钉方式^[18],正三角的排布还会成为术后股骨头坏死的危险因素^[19]。

股骨颈的三维形态存在不规则性,即不是传统意义上的圆柱形或三棱柱形,而是近端以三棱柱为主,向远端逐渐移行为四棱柱形。本研究发现股骨颈后上方是一斜面,不是圆滑的曲面,根据股骨颈的正常解剖形态特点,我们首次提出了股骨颈骨折空心螺钉斜三角构型的观点。我们应用三维有限元技术对股骨颈骨折空心螺钉治疗的两种不同构型进行了对比分析,研究显示在相同载荷下无论是股骨头的最大位移,还是各个螺钉的最大位移,我们提出的斜三角构型均明显小于倒三角构型,这说明在对抗剪切力时,斜三角构型较传统的倒三角构型更具优势。斜三角构型中各枚螺钉的应力分布以及股骨头的应力分布较倒三角构型更加合理,这说明斜三角构型较传统的倒三角构型更能避免螺钉及股骨头的应力过度集中,从而避免内固定断裂失败等情况发生。因此,我们认为空心螺钉斜三角构型更符合高海拔地区人群股骨颈的正常解剖结构特点。临床上应用空心螺钉治疗股骨颈骨折时,斜三角的构型对骨折的固定更加坚强,斜三角构型中后方螺钉低于前上方螺钉,这就避免了后方螺钉于股骨颈后上斜面穿出的风险,同时也一定程度上降低了螺钉穿出造成股骨头血供损伤的风险。斜三角构型能最大限

度的将应力分散,也是与股骨颈解剖结构最符合的构型,在一定程度上能避免螺钉断裂、复位丢失、固定失败等一系列严重并发症的发生。因此,相对于股骨颈空心螺钉的传统倒三角构型,斜三角构型具有更好的安全性及稳定性,对股骨颈骨折能起到更加稳定的固定作用,是一种理想构型。

本研究的缺点是通过有限元方法进行分析,我们创建的骨折模型仅仅是经颈型股骨颈骨折模型,以后需要对不同类型的股骨颈骨折模型进行有限元分析来证实我们的观点。

参 考 文 献

- 1 Liu P, Zhang Y, Sun B, et al. Risk factors for femoral neck fracture in elderly population [J]. *Zhong Nan Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban*, 2021, 46(3): 272-277.
- 2 Díaz AR, Navas PZ. Risk factors for trochanteric and femoral neck fracture [J]. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol*, 2018, 62(2): 134-141.
- 3 石洪允, 李无阴, 张颖, 等. 207例股骨颈骨折的危险因素分析 [J]. *中国医药科学*, 2020, 10(2): 7-9+27.
- 4 Gardner MP, Chong AC, Pollock AG, et al. Mechanical evaluation of Large-Size Fourth-Generation composite femur and tibia models [J]. *Ann Biomed Eng*, 2010, 38(3): 613-620.
- 5 Grassi L, Väänänen SP, Amin YS, et al. Experimental validation of finite element model for proximal composite femur using optical measurements [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2013, 21: 86-94.
- 6 Heiner AD. Structural properties of fourth-generation composite femurs and tibias [J]. *J Biomech*, 2008, 41(15): 3282-3284.
- 7 Chen WP, Tai CL, Shih CH, et al. Selection of fixation devices in proximal femur rotational osteotomy: clinical complications and finite element analysis [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2004, 19(3): 255-262.
- 8 Johnell O, Kanis JA. An estimate of the worldwide prevalence and disability associated with osteoporotic fractures [J]. *Osteoporos Int*, 2006, 17(12): 1726-1733.
- 9 Dy CJ, Mccollister KE, Lubarsky DA, et al. An economic evaluation of a systems-based strategy to expedite surgical treatment of hip fractures [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2011, 93(14): 1326-1334.
- 10 李树明, 梁永辉, 刘申, 等. 双动全髋关节置换与半髋关节置换治疗老年股骨颈骨折的近期疗效比较 [J]. *中华老年多器官疾病杂志*, 2020, 19(7): 490-493.
- 11 邱旭升, 戚晓阳, 陈一心, 等. 空心加压螺钉治疗老年无移位型股骨颈骨折的长期随访研究 [J]. *中华老年骨科与康复电子杂志*, 2019, 5(1): 9-12.
- 12 张栋, 喻爱喜, 余国荣, 等. 中青年 Garden III和IV型股骨颈骨折两种手术方法的对比研究 [J]. *中华显微外科杂志*, 2018, 41(5): 428-432.
- 13 Damany DS, Parker MJ, Chojnowski A. Complications after intracapsular hip fractures in young adults [J]. A meta-analysis of 18 published studies involving 564 fractures. *Injury*, 2005, 36(1): 131-141.
- 14 Mei J, Liu S, Jia G, et al. Finite element analysis of the effect of cannulated screw placement and drilling frequency on femoral neck fracture fixation [J]. *Injury*, 2014, 45(12): 2045-2050.
- 15 Zhang LZ, Gao J, Zc Z, et al. [Comparison of clinical effects of total artificial hip replacement and cannulated screw fixation for the treatment of displaced femoral neck fractures in elderly patients] [J]. *Zhongguo Gu Shang*, 2018, 31(2): 103-110.
- 16 Wani IH, Sharma S, Latoo I, et al. Primary total hip arthroplasty versus internal fixation in displaced fracture of femoral neck in sexa- and septuagenarians [J]. *J Orthop Traumatol*, 2014, 15(3): 209-214.
- 17 Xue Y, Wang XF, Zhao FL, et al. Finite element analysis of new headless compression supporting screw for the treatment of unstable femoral neck fracture [J]. *Biomed Mater Eng*, 2022, 33(4): 279-292.
- 18 Li J, Wang M, Zhou J, et al. Optimum configuration of cannulated compression screws for the fixation of unstable femoral neck fractures: finite element analysis evaluation [J]. *Biomed Res Int*, 2018: 1271762.
- 19 王沈栋, 余昶, 董启榕. 闭合复位空心螺钉治疗股骨颈骨折后股骨头坏死的影响因素分析 [J]. *中华老年骨科与康复电子杂志*, 2019, 5(5): 284-290.

(收稿日期:2022-06-15)

(本文编辑:吕红芝)

张学斌, 雷凯, 任荣, 等. 高海拔地区股骨颈骨折空心螺钉斜三角与倒三角构型的三维有限元对比研究 [J/CD]. *中华老年骨科与康复电子杂志*, 2022, 8(4): 205-210.