

文章编号:1004-7220(2012)02-0152-07

基于非线性材料股骨颈骨折固定方式

王沫楠, 郭鸿书

(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 目的 对股骨颈骨折内固定治疗方法中的螺钉固定角度、螺钉数量和螺钉组合方式进行合理选择,以达到最佳的复位稳定性。**方法** 以 DICOM 数据为基础,建立基于 Lindon 分型方式的包含不同角度、数量和组合方式的股骨颈骨折内固定三维有限元模型,并依据材料属性参数与 CT 图片灰度值之间的关系为模型赋予非线性的材料性质,模拟生理载荷条件对模型进行加载。**结果** 临床常见骨折面角度所对应的最佳单钉固定角度为 65° 和 70°;在手术条件允许的情况下,螺钉数量越多,固定效果越好;3 钉呈倒三角放置略优于 3 钉呈正三角放置,3 钉呈正三角放置优于 2 钉,而 2 钉平放与 2 钉斜放的优劣取决于骨折面角度。**结论** 骨折面角度对固定的效果有重要影响,股骨颈骨折内固定三维模型的加载仿真过程能够为股骨颈骨折内固定方式的研究提供一种可行途径。

关键词: 股骨颈骨折; 固定; 材料属性; 有限元分析; 载荷; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Fixation for femoral neck fracture based on nonlinear materials

WANG Mo-nan, GUO Hong-shu (*Mechanical and Power Engineering College, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China*)

Abstract: Objective To make a reasonable selection from internal fixation methods for treating femoral neck fracture, namely the fixation angle of a single screw, the number of screws and the combination mode of screws, so as to obtain the optimal stability of fracture reduction. **Methods** Based on the DICOM data and Lindon mode, a three-dimensional finite element model of femoral neck fracture fixation was built including different angles, numbers and combination modes of the screws. The model was attributed to nonlinear material properties based on the relationship between the property parameters of bone materials and the gray value of CT images, and loaded under the simulation of physiological loads. **Results** Corresponding to different angles of the fracture surface, the optimal fixation angle of the single screw was 65° and 70° in clinic. The more the number of screws, the better the effect of fixation, when the surgical condition was permitted. The inverted triangle placement was better than the triangle placement in case of three-screw fixation, while the triangle placement was superior to two-screw fixation, but the decision on the placement of two-screw fixation in flat form or diagonal form depended on the angle of the fracture surface. **Conclusions** Different angles of the fracture surface have significant impacts on the effect of fixation, and the loading simulation process on the three-dimensional model can provide a feasible way to the study of the fixation for the femoral neck fracture.

Key words: Femoral neck fracture; Fixation; Material properties; Finite element analysis; Loads; Biomechanics

股骨颈骨折是骨科临床常见损伤,约占全身骨折的 3.6%^[1];随着全社会平均寿命的延长,其发生

率亦有增加的趋势。由于功能与解剖方面的特点,股骨颈骨折部位常承受较大的扭转和剪切力,对骨

收稿日期:2011-08-01; 修回日期:2011-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61073144),黑龙江省新世纪优秀人才培养计划(251NCET006),黑龙江省自然科学基金重点项目(15008002-11008)。

通讯作者:王沫楠,教授,E-mail: qqwmnan@163.com。

折及骨折复位后的稳定性有很大影响,从而影响固定的效果。目前,手术复位和内固定依然是股骨颈骨折治疗的首选方案^[2],而在内固定方案中增加固定强度和改善血液供应,能够明显提高愈合质量。因此,在复杂的解剖关系下,合理选择与骨折角度相适应的内固定方案的螺钉固定角度、螺钉数量和螺钉组合方式,使骨折端的固定强度达到最佳是十分必要的。近年来,有限元方法的应用为临床医学提供了新的思路,对于制定股骨颈骨折治疗方案和预见治疗效果有重要意义。一些学者已经利用有限元方法进行了研究,但仍存在以下缺陷:第一,制定实验方案时没有考虑骨折线角度这一重要因素,使得研究结果只是经验性总结而缺乏科学论证;第二,模型的三维重建过程采用三维建模软件来实现,所使用的图像处理算法不成熟,致使得到的模型外形轮廓与实物相差较多;第三,在为模型赋予材料性质时将骨骼简化为各向同性的线弹性的单一材料,这与骨骼本身非线性、各向异性的材料特征相差甚远。

本研究将对上述问题做出改进。首先,制定基于 Lindon 分型方式的实验方案,选用多种不同的骨折线角度,并对临床上常见的 50°和 70°骨折线角度进行重点分析。然后,采用更成熟的医学图像处理技术软件来更为精确地定义股骨近端的三维外形结构。最后,利用 CT 图像灰度值、表观密度和材料特性之间的关系,对不同灰度区域的骨质分别赋予材料性质,使得赋材质后的模型呈现与真实骨骼近似的非均匀性和各向同性,为在分析中得到更为真实的股骨颈骨折复位后受力情况做好准备。

1 股骨颈骨折固定方式评价指标

结合临床实际,股骨颈骨折的固定需要考虑以下 3 方面要求^[3]: ① 整体结构稳定性,载荷作用于股骨头会发生位移,位移越小说明骨折固定稳定性越强;② 骨折面张开位移,载荷作用下骨折面张开位移过大会影响骨折愈合;③ 固定方式的抗扭性,在相同扭转力情况下的纵向位移越小则说明该固定方式的抗扭性越好。其中,整体稳定性是评价固定方式优劣的主要依据。

依据上述要求,提出以下评价指标:① 股骨头最大冠状面位移(UX)。体现固定模型的抗压能力和稳定性,位移越小越稳定。② 股骨头最大矢状面

位移(UY)。反映固定模型的抗扭转能力,位移越小,抗扭转能力越强。③ 股骨头最大轴向位移(UZ)。体现固定模型的抗压、抗剪切能力和稳定性,位移越小说明抗压、抗剪能力越强,稳定越高。④ 股骨头总位移(US)。体现固定模型的整体稳定性,综合评价前 3 项指标的效果,位移越小模型越稳定。⑤ 股骨颈骨折面最大缝距(UF)。体现骨折面的愈合情况,裂缝越大,骨折愈合情况越差。

2 股骨颈骨折内固定有限元模型

2.1 股骨颈骨折内固定有限元模型的参数

2.1.1 螺钉参数 采用临床 AO/ASFI 空心加压螺纹钉。由于研究重点与螺纹关系不大,故忽略螺纹细节。螺钉尺寸为:螺纹部分直径 7.3 mm,无螺纹部分直径 4.8 mm,螺钉长度可根据临床需要进行调整。

2.1.2 有限元模型材料参数 骨骼是一种复杂的物质,由胶原纤维和羟基磷灰石组成,生物力学上表现为非均质各向异性。随着多排螺旋 CT 扫描技术发展,通过它对骨骼进行扫描不但可以比较准确地得到骨骼的外形轮廓,而且可以获得能够定义骨骼材料特性的骨骼体素。医学图像处理软件会基于这些体素数据,根据下式计算出骨骼表观密度的分布情况:

$$\rho_{\text{app}} = 1.9 \cdot \frac{HU}{1700} \quad (1)$$

式中: ρ_{app} 是骨骼材料的表观密度(单位 g/cm^3); HU 是 CT 图像的灰度值。根据骨骼的经验公式^[7-8]可以得到骨骼与 HU 有关材料属性设置式;进行骨骼单元材料属性计算,使骨骼呈现非均质、各向同性性质。在对整体股骨颈骨折内固定模型的材料属性设置时要对股骨头、股骨干和螺钉进行分别设置,最后得到 400 种股骨头材料,400 种股骨干材料,螺钉设置弹性模量 110 GPa,泊松比 0.3。

骨骼的非线性材料属性设置公式为

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{trabecular}} &= 1904 \times \left(1.9 \cdot \frac{HU}{1700}\right)^{1.64} \\ E_{\text{cortical}} &= 2065 \times \left(1.9 \cdot \frac{HU}{1700}\right)^{3.09} \\ \lambda &= 0.3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{trabecular}}$ 为松质骨的弹性模量; E_{cortical} 为密质骨

的弹性模量; λ 为泊松比。

2.1.3 边界条件和载荷参数 由于股骨的受力情况比较复杂,本文将通过模拟步态单足负重站立简化受力模型^[10]来确定模型的边界条件和载荷参数,研究体重为 70 kg 的成人在缓慢行走、单足着地状态下测得的股骨受力(见图 1、表 1)。

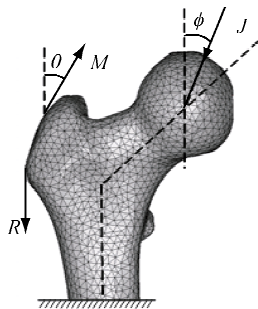


图1 股骨受力模型
Fig.1 Force model of the femur

表1 载荷列表

Tab.1 Load list

髌关节		外展肌		髂胫束肌	
J/kN	角度/(°)	M/kN	角度/(°)	R/N	角度/(°)
1.588	24.4	1.039	29.5	169	0

2.2 骨折角度、螺钉固定角度、螺钉数量、螺钉组合方式的选取

螺钉固定角度、螺钉数量和螺钉组合方式是最重要的人为可调整因素,适当的角度和合理的组合方式可以使螺钉上、下两部分骨折断面上的应力分布趋于合理,避免应力集中导致的骨骼吸收和骨骼愈合受阻,从而获得更好的临床治疗效果。

根据临床股骨颈骨折常见情况,本研究选取模型骨折线在股骨颈中间部位,并假设骨折面完全断裂。如图 2 所示,骨折角度用 Lindon 角 $\angle\alpha$ 表示,螺钉固定角度用 $\angle\beta$ 表示。本研究的骨折角度选取临床常见的 $\alpha = 50^\circ$ 和 $\alpha = 70^\circ$,螺钉固定角度 β 选取 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$,螺钉数量在考虑手术复杂程度的基础上选取 1 枚、2 枚、3 枚,螺钉组合方式选取单钉、2 钉平放置、2 钉斜放置、3 钉正三角放置和 3 钉倒三角放置。根据研究的目的,通过以上数据的组合分别建立有限元模型 26 个。图

3 为 $\alpha = 50^\circ, \beta = 70^\circ$,单钉固定方式的未进行网格划分的三维重建模型;图 4 为 $\alpha = 50^\circ, \beta = 65^\circ$,2 钉平方与 2 钉斜放固定方式的三维模型;图 5 为 $\alpha = 50^\circ, \beta = 65^\circ$,3 钉正三角和 3 钉倒三角固定方式的三维模型。

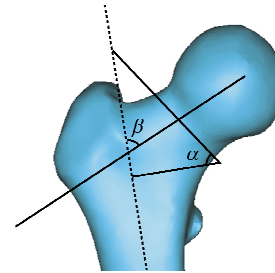


图2 骨折角度与螺钉固定角度
Fig.2 Angle of fracture and fixation angle of the screw



图3 $\alpha = 50^\circ, \beta = 70^\circ$ 时单钉固定的三维模型
Fig.3 Three-dimensional model of the single screw fixation when $\alpha = 50^\circ$ and $\beta = 70^\circ$

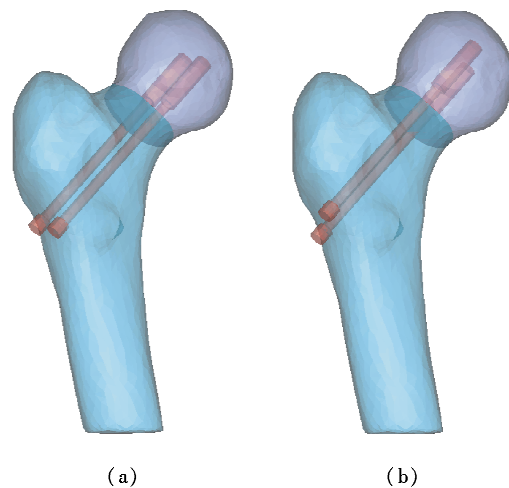


图4 $\alpha = 50^\circ, \beta = 70^\circ$ 时 2 钉平放 (a) 与斜放 (b) 固定方式的三维模型
Fig.4 Three-dimensional model of two-screw fixation in flat form (a) and diagonal form (b) when $\alpha = 50^\circ$ and $\beta = 70^\circ$

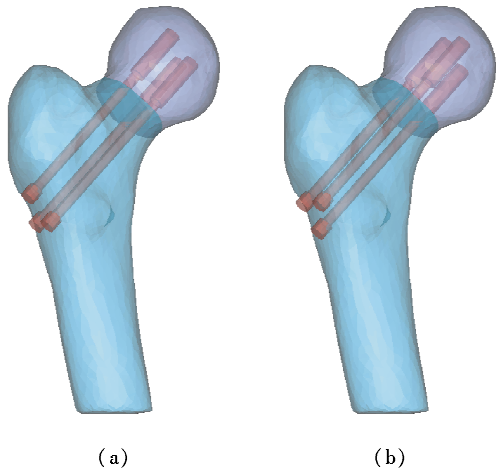


图5 $\alpha=50^\circ, \beta=70^\circ$ 时3钉正三角(a)和3钉倒三角(b)固定方式的三维模型

Fig.5 Three-dimensional model of three-crew fixation with triangle placement (a) and inverted triangle placement (b) when $\alpha=50^\circ$ and $\beta=70^\circ$

3 股骨颈骨折内固定有限元分析

3.1 螺钉固定角度分析

股骨头所承担的力是垂直向下的人体重力的一部分,需要沿股骨颈的方向传递给大转子即股骨,故力的方向发生了变化,这必然导致在股骨颈上应力的重新分布。内固定时,应力的重新分布规律受多种因素的影响,包括螺钉的固定角度 β 、预紧力、骨折面的角度 α 、骨折端的复位情况和局部软组织条件等。在以上诸多因素中, β 是最重要的人为可调因素,合理的 β 角度可以使螺钉上下两部分骨折断面上的应力分布趋于合理,避免个别部分的应力集中导致骨吸收和骨愈合受阻,从而达到最佳的临床治疗效果。

图6和图7分别为 $\alpha=50^\circ$ 和 $\alpha=70^\circ$ 时,螺钉固定角度 β 对内固定稳定性的影响。

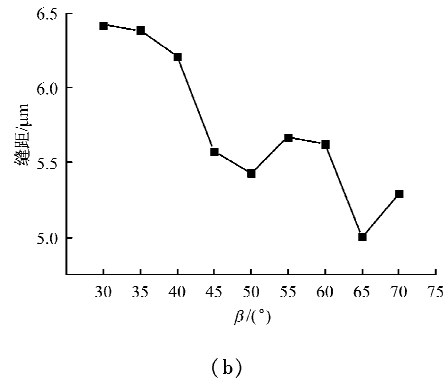
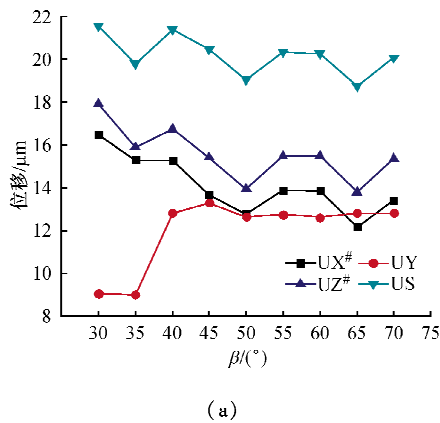


图6 $\alpha=50^\circ$ 时单钉固定节点位移情况(a)和骨折面最大裂纹(b)

Fig.6 Displacement (a) and the maximum crack distance of fracture surface (b) by single-screw fixation when $\alpha=50^\circ$

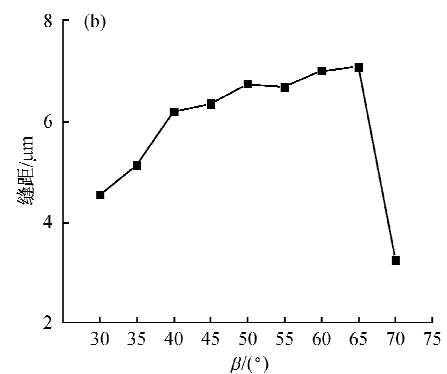
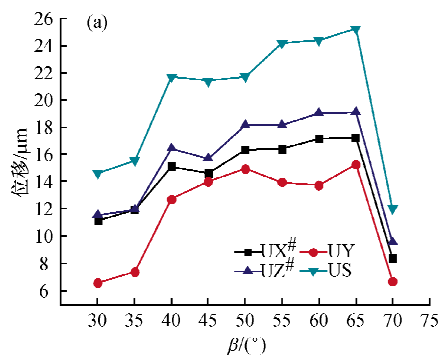


图7 $\alpha=70^\circ$ 时单钉固定节点位移情况(a)和骨折面最大裂纹(b)

Fig.7 Displacement (a) and the maximum crack distance of fracture surface (b) by single-screw fixation when $\alpha=70^\circ$

单钉、2钉及3钉所得的结论类似,说明在不同的螺钉固定角度时的应力分布和位移变化的趋势基本一致,在此仅对单钉实验结果加以说明。从图6可以看出,随着螺钉固定角度的变化,UX、UZ在一定范围内波动,并呈现逐渐下降的趋势,最小值出现在 $\beta=65^\circ$ 时;UY的变化除了前面的急剧增加外,后面变化不明显;US变化基本和UX、UZ一致;骨折面最大缝距UF随着 β 的增加总体呈现下降趋势,在 $\beta=65^\circ$ 时出现最小值。图7中节点位移和骨折面最大缝距变化趋势基本一致,并且在 $\beta=70^\circ$ 时出现最小值。

采用同样的有限元仿真研究可以得到当骨折面角度 α 为各种角度时,最优的螺钉固定角度 β (见表2)。骨折面角度在 55° 以上时,其固定角度均与穿钉角度相等,即螺钉固定角度与骨折面垂直。但是,由于股骨内部不同位置骨质情况不尽相同,对螺钉在把持力上有一定影响,所以不能盲目地认为穿钉角度与骨折面垂直时固定效果最佳。

表2 不同骨折面角度对应的最佳螺钉固定角度

Tab.2 The optimal fixation angle under different fracture angles

骨折角度 $\alpha/(\circ)$	30	40	50	55	60	65	70
最优固定角度 $\beta/(\circ)$	50	50	65	55	60	65	70

3.2 螺钉数量分析

股骨颈骨折内固定后螺钉是主要的传力部件,螺钉卸载时最大应力发生在与骨折面重合的界面上侧。由于骨折面是完全断裂的,当股骨头受到髋关节的压力时,其上端会产生微量的张开位移。图8和图9分别为 $\alpha=50^\circ$ 、 $\beta=65^\circ$ 和 $\alpha=70^\circ$ 、 $\beta=70^\circ$ 时螺钉数量对内固定稳定性的影响;其中, β 值选择了在单钉固定稳定性实验中 α 所对应的最佳 β 。由图8可见,UX、UZ和US均随着螺钉数量的增加而减小,仅UY在2钉固定时出现最低点,而且与3钉固定时的差异很小;而由图9可见,UX、UY、UZ和US均随着螺钉数量的增加而减小。从以上结果可以看出,2钉时除抗扭性较好(即UY较小)外其余指标

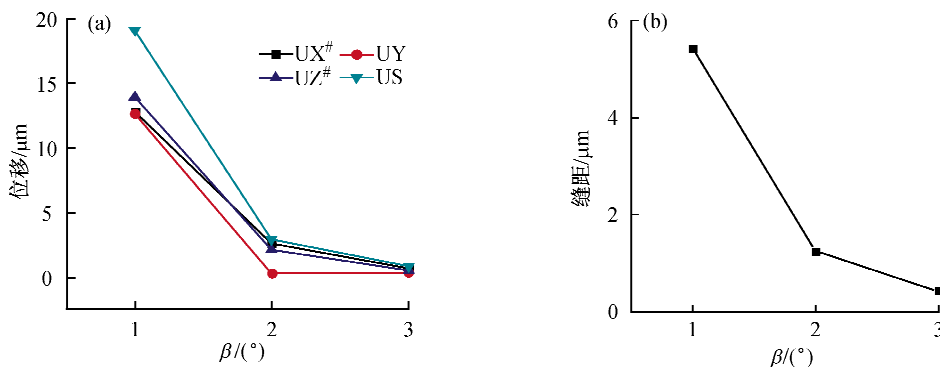


图8 $\alpha=50^\circ$ 时螺钉数量变化时节点位移情况(a)和骨折面最大缝距(b)

Fig. 8 Displacement (a) and the maximum crack distance of fracture surface (b) by change in screw numbers when $\alpha=50^\circ$

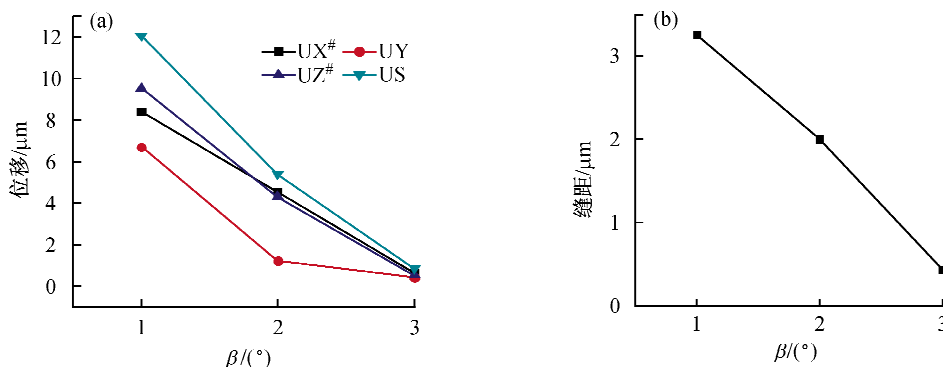


图9 $\alpha=70^\circ$ 螺钉数量变化时节点位移情况(a)和骨折面最大缝距(b)

Fig. 9 Displacement (a) and the maximum crack distance of fracture surface (b) by change in screw numbers when $\alpha=70^\circ$

均不如3钉放置。在股骨颈骨折内固定方式的研究中,评定固定方式好坏的4条指标应当进行综合考虑。因此,从图线的总体走势来看,螺钉数量越多,内固定综合稳定性越好,但临床上有时需要与患者骨质状况、手术难度和成本一起进行综合考虑。

3.3 螺钉组合方式分析

临床股骨颈骨折固定时需注意不能损伤血管,即对打钉的位置有严格要求,因此仅以下几种组合方式进行研究,即2钉平放、2钉斜放、3钉正三角放置和3钉倒三角放置。图10和图11分别为 $\alpha = 50^\circ$ 、 $\beta = 65^\circ$ 和 $\alpha = 70^\circ$ 、 $\beta = 70^\circ$ 时,螺钉组合方式对内固定稳定性的影响,这里 β 的取值原则与上节相同。

由图10可见,从几种固定方式的综合效果来看,2钉平放时除抗扭性(即UY值较小)较好外,其

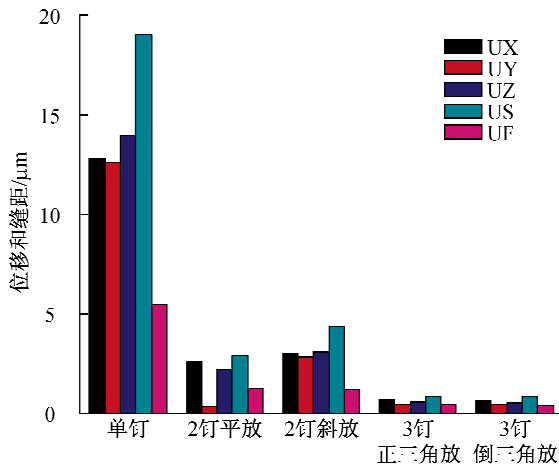


图10 $\alpha = 50^\circ$ 时不同螺钉组合方式下位移、缝距直方图
Fig. 10 Histogram of displacement and crack distance under different combination modes of screws when $\alpha = 50^\circ$

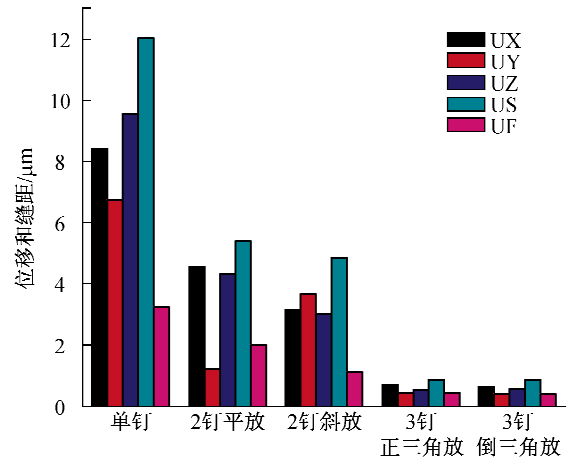


图11 $\alpha = 70^\circ$ 时不同螺钉组合方式下位移、缝距直方图
Fig. 11 Histogram of displacement and crack distance under different combination modes of screws when $\alpha = 70^\circ$

余指标均不如3钉放置,故3钉固定方式无论在整体稳定性上和结合面张开位移上,还是在固定方式抗扭转能力上都具有单钉固定方式和2钉固定方式所不及的优势。而将表3中的具体数据进行比较可知,3钉倒三角形放置略优于3钉正三角形放置;由图11同样可以得到3钉固定方式最优的结论。而且骨折面角度越大,说明骨折端所受的垂直剪应力越大,整体稳定性越难以保证,这就使得3钉固定方式比其他效果更为明显,而2钉平放与2钉斜放的优劣与骨折面角度有很大关系。观察矢状面位移,2钉平放与斜放差距较为明显,即螺钉平放时模型抗扭转能力较强,说明2钉固定时,模型抗扭性能直接决定于螺钉的构型关系,固定时注意控制好螺钉倾斜角度。在3钉固定时,最大纵向位移差别不大,即各模型抗扭转能力相当;当改变螺钉之间距离时,纵

表3 不同螺钉组合方式下固定情况

Tab.3 Fixation condition under different combination modes of screws

单位: μm

组合方式($\alpha = 50^\circ$)	UX	UY	UZ	US	UF
3钉正三角放置	0.672 55	-0.417 30	-0.549 24	0.862 51	0.409 01
3钉倒三角放置	0.615 70	-0.461 65	-0.503 62	0.831 45	0.390 88
组合方式($\alpha = 70^\circ$)	UX	UY	UZ	US	UF
3钉正三角放置	0.666 98	-0.439 47	-0.541 12	0.865 95	0.426 76
3钉倒三角放置	0.656 70	-0.418 88	-0.557 15	0.858 30	0.407 91

向位移有了一定变化,说明此时抗扭性能与螺钉的构型关系不大,而与螺钉在骨内构成的立体框架结构大小有关。螺钉数量变化对冠状面位移和轴向位移的影响较大,说明模型抗压能力和抗剪切能力主要取决于固定强度,即螺钉数量。

4 结论

随着现代外科手术逐渐趋向于微创,内固定方法治疗股骨颈骨折对于提高骨折愈合率有明显的优势。这种手术创伤小、时间短、不暴露骨折端,更重要的是对股骨头血液运输破坏较小。本研究基于准确的三维重建模型和非线性材料模型进行了股骨颈骨折内固定复位有限元仿真研究,为股骨颈骨折内固定手术方案的制定和治疗效果判断提供了理论依据。本文得出的主要结论有:

(1) 股骨颈骨折固定时骨折面角度对穿钉角度有重要影响,手术时要具体情况具体分析,结合骨折创伤程度和患者骨质情况确定最佳的螺钉固定角度。螺钉固定角度与骨折面垂直的结论理论深度不足,但对临床仍有借鉴意义。

(2) 螺钉数量越多固定效果越好。但由文献[3]的描述可知,螺钉的数量超过3个将对骨质结构成破坏,并影响股骨头血液运输,因此推荐使用3钉固定法。

(3) 螺钉组合方式的优劣关系是3钉呈倒三角放置优于3钉呈正三角放置,3钉呈正三角放置优于2钉,2钉平放优于单钉。而2钉平方和斜放优劣与骨折面角度有关,骨折角度较大时,建议避免使用2钉平方固定。在骨折面角度较小时,3钉固定的优势较2钉固定不明显。这些结论均与现有研究结果一致,说明了模型的可行性和准确性。

(4) 髋关节的实际受力情况受众多因素影响,同时股骨颈骨折的类型众多,本研究为股骨颈骨折固定方式的研究规划了一条可行的途径,但更贴实际的结果还需要大量案例的仿真结果和生物力学测试结果的支持,有待在今后的工作中补充与完善。

参考文献:

[1] 刘建宁. 两种不同螺纹方向加压螺钉内固定股骨颈骨折的实

验研究[D]. 石家庄:河北医科大学硕士学位论文,2009.

- [2] Booth KC, Donaldson TK, Dai Q, *et al.* Femoral neck fracture fixation: A biomechanical study of two cannulated screw placement techniques [J]. *Orthopedics*, 1998, 21(11): 1173-1176.
- [3] 黄彰, 苏家庆, 吴冬雷, 等. 膨胀式带锁加压钉治疗股骨颈骨折的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2002, 17(2): 101-102.
- Huang Z, Su JQ, Wu DL, *et al.* The biomechanical study on the fixation of the femoral neck fracture with the interlocking expanding compressive screw [J]. *J Med Biomech*, 2002, 17(2): 101-102.
- [4] 汪家旺, 王德杭, 张廉良, 等. 骨组织CT值与骨结构成分间的关系研究[J]. *中国医学影像技术*, 2004, 20(9): 1328-1330.
- [5] 杨成伟, 李全, 孙伟, 等. 内收型股骨颈骨折多根空心螺钉固定的三维有限元分析[J]. *中国矫形外科杂志*, 2009, 17(14): 1077-1080.
- [6] 张国栋, 廖维靖, 陶圣祥, 等. 股骨颈有限元分析的赋材料属性方法探讨及有效性验证[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2009, 13(52): 10263-10268.
- [7] Yosibash Z, Padan R, Joskovicz L, *et al.* A CT-based high-order finite element analysis of the human proximal femur compared to in-vitro experiments [J]. *J Biomech Eng*, 2007, 129(3): 297-309.
- [8] Wirtz DC, Schiffers N, Pandorf T, *et al.* Critical evaluation of known bone material properties to realize anisotropic FE-simulation of the proximal femur [J]. *J Biomech*, 2000, 33(10): 1325-1330.
- [9] 王玉臣, 周振平, 苏继军. 人工股骨头置换前后股骨的应力分析[J]. *吉林工业大学自然科学学报*, 2000, 30(3): 61.
- [10] Carter DR, Hayes WC. The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1977, 59(9): 54-62.
- [11] 漆伟, 雷伟, 严亚波. 椎弓根螺钉长度变化对螺钉-骨复合体模型应力影响的三维有限元分析研究[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(3): 206-211.
- Qi W, Lei W, Yan YB. Three dimensional finite element analysis of stress distribution on continuously varying of length of pedicle screw [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(3): 206-211.
- [12] 牛文鑫, 丁祖泉. 三种三维有限元建模方法在跟骨模型建立中的应用和比较[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(4): 345-346.
- Niu WX, Ding ZQ. Comparative study on three different methods applied to establish 3D finite element calcaneus model [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(4): 345-350.