

# 儿童肱骨髁上骨折模型克氏针固定构型的三维有限元分析

刘祥飞, Allieu Kamara, 刘闯, 王恩波, 季相禄, 刘天婧, 李麒麟

(中国医科大学附属盛京医院, 辽宁 沈阳 110000)

**【摘要】** 目的: 建立带骺软骨儿童肱骨远端新力学模型, 模拟肱骨髁上骨折并进行三维有限元分析, 研究克氏针的数量、针道、出口高度及穿针构型对固定稳定性的影响。方法: 于图片存档及通信系统 (picture archiving and communications system, PACS) 中挑选 1 名 6 岁男孩的正常肱骨远端三维 CT, 将图像数据导入 Simpleware 及 SolidWorks 2016 软件, 构建 1 个含有肱骨小头骨化中心及远端骺软骨的儿童肱骨远端模型。制作常见伸直型儿童肱骨髁上骨折模型, 并模拟交叉克氏针及单纯外侧克氏针的多种固定构型, 在屈伸、内外翻方向施加 30 N, 内外旋方向施加 5 N 的力, 通过远折端的位移情况分析其稳定性。结果: 2 枚克氏针固定构型中, 出口在骨干-干骺端交界区 (metaphyseal-diaphyseal junction, MDJ) 上缘的 2 枚交叉针最稳定, 可对抗超过 2 585 Nmm/° 的旋转应力; 而在对抗屈伸及内外翻应力测试中, 低位针经过肱骨小头骨化中心的 2 枚外侧针最稳定, 分别可对抗接近 45 N/mm 及 190 N/mm 的应力。在最稳定的外侧 2 枚克氏针构型中加入第 3 根针, 所有方向上的稳定性显著增加, 其中 3 枚交叉针最稳定, 屈伸、内外翻及内外旋时分别可对抗 198 N/mm、395 N/mm 及 6 251 Nmm/° 的应力。结论: 2 枚外侧分散针可为儿童肱骨髁上骨折提供足够的稳定性。在 2 枚交叉针构型中, 出口高度在 MDJ 区域上缘的交叉针最稳定。3 枚交叉针构型在所有研究构型中最稳定。

**【关键词】** 肱骨骨折; 儿童; 骨折固定术; 有限元分析

中图分类号: R35

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2020.10.012

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



**Three-dimensional finite element analysis of Kirschner wire fixation configuration for supracondylar fracture of humerus fracture in children** LIU Xiang-fei, Allieu Kamara, LIU Chuang, WANG En-bo, Ji Xiang-lu, LIU Tian-jing, and LI Qi-lin. Shengjing Hospital of China Medical University, Shenyang 110000, Liaoning, China

**ABSTRACT Objective:** To establish a new mechanical model of distal humerus in children with epiphysial cartilage, stimulate supracondylar humerus fracture and perform three dimensional finite elements, and study effect of pins numbers, pin tract, outlet height and pin configurations on stability of fixation. **Methods:** Three dimensional computed tomography (CT) data of 6-year-old boy with distal humerus was downloaded from picture archiving and communications systems software (PACS), the data of picture was imported into Simpleware and SolidWorks 2016 software to establish distal humerus fracture in children contained ossific nucleus of the capitellum (ONC) and distal cartilage. Normal extense supracondylar humerus fracture model was established to stimulate configurations of crossed and lateral pinning fixation, 30 N was added on the direction of flexion-extension and varus-valgus, while 50 N was added on the direction of internal and external turning. Stability was analyzed by displacement degree of distal fracture. **Results:** Among 2-pin configurations, 2-crossed pins were more stable against rotation forces which could resist rotation stress over 2 585 Nmm/°, while low position through ONC of 2-divergent lateral pins were more stable, which could resist stress of 45 N/mm and 190 N/mm during the test of resistant strains and varus-valgus stress. The third pins was added into the more stable lateral 2-pins, the stability in all directions were increased obviously, and 3-crossed pins is the most stable, stress of flexion-extension, varus-valgus and internal-external turning were 198 N/mm, 395 N/mm and 6 251 Nmm/°. **Conclusion:** Two-divergent lateral pins could provide enough stability for supracondylar humerus fracture in children. In two-crossed pins, the upper border of MDJ could provide the best stability. Three-crossed pins could offer the best stability against both translation and rotation forces.

**KEYWORDS** Humeral fractures; Child; Fracture fixation; Finite element analysis

肱骨髁上骨折是最常见的儿童肘部骨折, 约占

全部肘关节损伤的 60%<sup>[1]</sup>。目前手法整复经皮克氏针固定是处理儿童肱骨髁上骨折的规范治疗。尽管经皮克氏针固定没有完全消除术中或术后的并发症, 但是同闭合复位石膏或夹板固定及其他的固定

通讯作者: 王恩波 E-mail: wangenbodor@163.com

Corresponding author: WANG En-bo E-mail: wangenbodor@163.com

方法相比较,经皮克氏针固定可显著减少并发症的发生率。但复位丢失仍是多数小儿骨科医生需要考虑的问题。经皮克氏针固定后导致固定丢失的原因与穿针方式,针的直径、数量、分布等相关<sup>[2-7]</sup>。除了上述因素,克氏针入针点及出针点在获得最大的稳定性及降低复位丢失的发生率中起着至关重要的作用。尽管有很多关于交叉克氏针固定和单独外侧克氏针固定的生物力学分析<sup>[6-14]</sup>,但是基于解剖精确的儿童骨的生物力学分析仍然缺乏。为此,笔者采用计算机辅助合成和有限元分析技术对解剖精确的三维儿童骨模型克氏针固定的多种构型进行生物力学比较。本研究的工作基于以下几个假设:(1)针的稳定性受肱骨远端结构的影响。(2)经肱骨小头穿针比直接在外侧穿针更加稳定。(3)出针点高的交叉针比出针点低的交叉针更加稳定。(4)在外侧 2 根针的基础上增加 1 根经尺骨鹰嘴窝的针比在外侧柱增加 1 根针更稳定。

## 1 材料与方法

### 1.1 构建儿童骨骼远端模型

从我院图片存档及通信系统 (picture archiving and communications system, PACS) 系统中挑选 1 名 6 岁男孩的正常肱骨远端三维 CT, 将图像文件 (Dicom 格式) 导入 Simpleware (Synopsis Inc., 加利福尼亚, 美国) 影像处理软件中。该 CT 数据的纳入原因是其能清晰显示肘关节软骨的轮廓。根据该 CT 图像的灰度重建模型的肱骨骨性部分及肱骨小头骨化中心的骨化部分, 通过软件自动生成肱骨远端软骨部分。将生成的完整肱骨远端模型导入 IGES 程序 (图 1)。

### 1.2 克氏针固定及有限元模型的制作

将完成的肱骨远端轮廓模型导入 SolidWorks 2016 (Dassaut Systemes-Simula, 法国) 生成肱骨远端实体模型。在尺骨鹰嘴水平人为制作 1 个典型的, 矢状面角度为 20° 的横行骨折线, 模拟常见的髁上骨折类型<sup>[2]</sup>。再用 1.6 mm 的圆柱模拟克氏针固定, 模拟 11 种交叉或外侧针固定模型。2 枚交叉克氏针固定构型, 根据针出口高度的不同又可分为交叉针 1, 交叉针 2, 交叉针 3, 交叉针 4, 交叉针 5 共 5 种构型 (图 2)。在 2 枚外侧针固定的构型中, 根据矢状面肱骨小头骨化中心 (ossific nucleus of capitellum, ONC) 位置来调整低位针的入针点, 共形成了 3 种构型: 低位针经过肱骨小头骨化中心的中 1/3, 低位针经过肱骨小头骨化中心的后 1/3, 低位针经过肱骨小头骨化中心的后侧 (图 3)。在最为稳定的 2 枚外侧针固定构型基础上增加 1 根内侧或外侧针形成 3 枚克氏针固定模型, 第 3 根针打在肱骨外侧柱的构型, 第 3 根针穿过鹰嘴窝构型和 3 枚交叉针构型见图 2。将这些固定模型导入 HyperMesh14 (Altair Engineering, 密歇根, 美国) 来进行预处理及融合, 进行有限元分析的材料属性根据表 1 来赋予<sup>[15-16]</sup>。

### 1.3 有限元计算及固定稳定性的判断

将完成的网状模型导入 Abaqus 6.14 (Dassaut Systemes-Simula, 法国) 中。在受力表面接近几何中心的位置选择一个节点作为指示点。在受力表面到指示点之间设定一系列约束条件。将肱骨近端固定, 在肱骨远端沿 x, -x 轴及 y, -y 轴施加 30 N 的力来模拟屈曲、伸直及内翻、外翻的载荷。沿 z, -z 轴施加 5 N 的力来模拟内旋、外旋载荷。记录远折端相对于

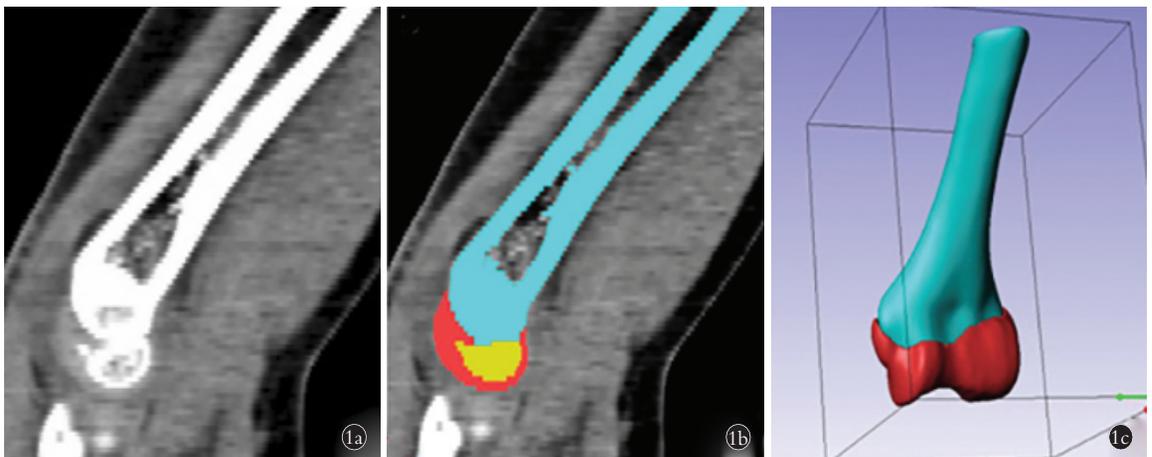


图 1 肱骨远端模型重建 1a. 肘关节三维 CT 矢状面图像 1b. 肱骨远端在矢状面上的软骨 2D 重建图像 1c. 带软骨的肱骨远端 3D 重建模型。肱骨远端软骨。肱骨小头骨化核及肱骨干远端分别用红色、黄色和蓝色表示  
Fig.1 Reconstruction of distal humerus model 1a. Sagittal view of three-dimensional CT of elbow joint 1b. Sagittal view of distal humerus showed 2D reconstructed of epiphysial cartilage 1c. 3D reconstructed view of distal humerus with epiphysial cartilage. distal humerus with epiphysial cartilage. ossific nucleus of capitellum and distal humerus were showed with red, yellow and blue

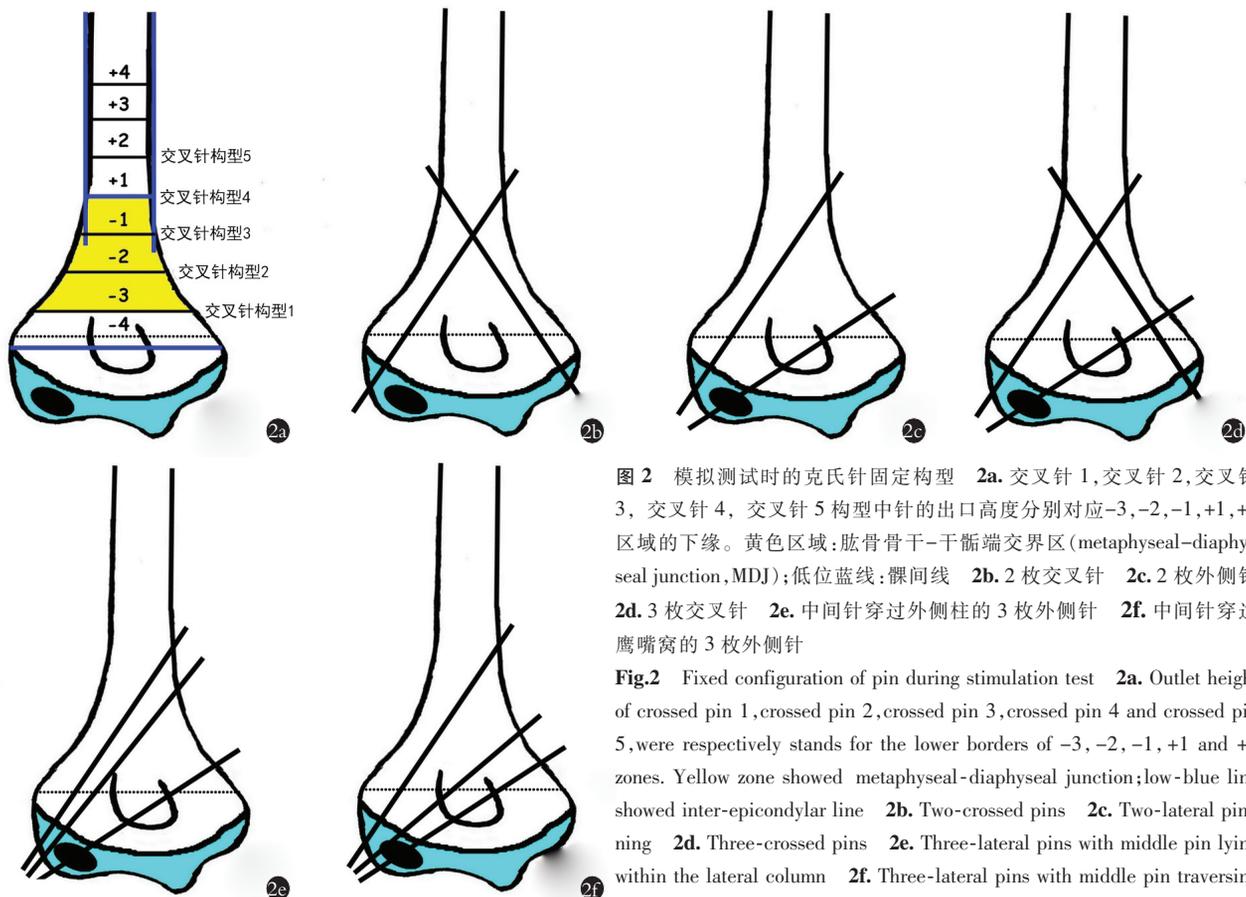


图 2 模拟测试时的克氏针固定构型 2a. 交叉针 1, 交叉针 2, 交叉针 3, 交叉针 4, 交叉针 5 构型中针的出口高度分别对应-3, -2, -1, +1, +2 区域的下缘。黄色区域: 肱骨骨干-干骺端交界区 (metaphyseal-diaphyseal junction, MDJ); 低位蓝线: 髁间线 2b. 2 枚交叉针 2c. 2 枚外侧针 2d. 3 枚交叉针 2e. 中间针穿过外侧柱的 3 枚外侧针 2f. 中间针穿过鹰嘴窝的 3 枚外侧针

Fig.2 Fixed configuration of pin during stimulation test 2a. Outlet height of crossed pin 1, crossed pin 2, crossed pin 3, crossed pin 4 and crossed pin 5, were respectively stands for the lower borders of -3, -2, -1, +1 and +2 zones. Yellow zone showed metaphyseal-diaphyseal junction; low-blue line showed inter-epicondylar line 2b. Two-crossed pins 2c. Two-lateral pinning 2d. Three-crossed pins 2e. Three-lateral pins with middle pin lying within the lateral column 2f. Three-lateral pins with middle pin traversing olecranon fossa

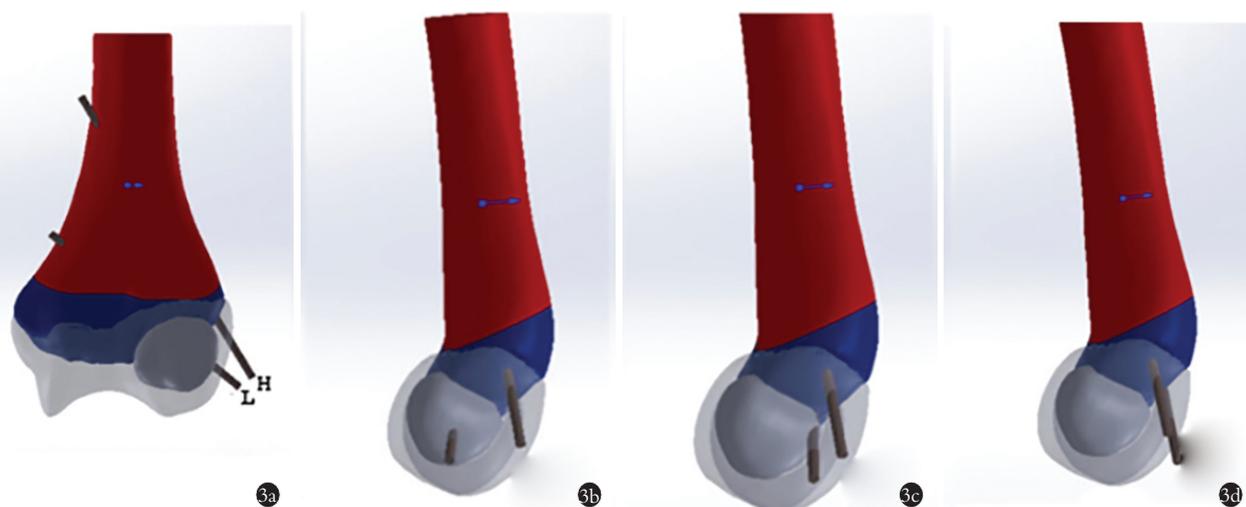


图 3 2 枚外侧针固定构型 3a. 2 枚针的位置在冠状面上是固定的 H: 高位外侧针; L: 低位外侧针。根据低位针在矢状面上依据 ONC 的位置的不同 3b. 低位针的位置在 ONC 的中 1/3 3c. 低位针的位置在肱骨小头的后 1/3 3d. 低位针的位置在 ONC 区域的后方 ONC: 肱骨小头骨化中心

Fig.3 Two-lateral pin configurations 3a. Position of pin was fixed in only the coronal plane H: higher lateral pin; L: lower lateral pin. The position of pin L was varied with respect to the ONC in the sagittal plane 3b. Position of low-pin was located on the middle third of the ONC 3c. Position of low-pin was located on posterior third of ONC 3d. Position of low-pin was located on the posterior to ONC zone ONC: ossific nucleus of the capitellum

近端发生的最大位移并计算其相应的稳定性。

## 2 结果

在 2 枚交叉克氏针固定构型中, 比较了不同出口高度下克氏针的稳定性。交叉针构型 4 (针的出口

高度在 MDJ 区的上缘) 在各个方向的稳定性都是最好的, 可对抗超过 2 585 Nmm/° 的旋转应力。在此基础上, 在 MDJ 区域上方继续增加针的出口高度, 针的稳定性并不会继续增加。交叉针构型 5 在内旋及

表 1 材料属性、有限元数目及有限元模型节点

Tab.1 Material properties, number of elements and nodes of the finite element models

部分	有限元类型	有限元数目	节点数目	Young's 系数 (MPa)	泊松比 ( $\lambda$ )
皮质骨	C3D6	94 592	68 822	11 670	0.28
松质骨	C3D4	255 931	56 916	70	0.2
骨化中心	C3D4	36 328	7 864	70	0.2
软骨	C3D4	169 888	36 627	15	0.45
2 枚针	C3D8R	4 384	6 072	200 000	0.33
3 枚针	C3D8R	5 952	8 250	200 000	0.33

外旋的稳定性上较交叉针构型 4 分别减少了 7% 和 12%。对比 2 根外侧针固定时,发现经肱骨小头骨化中心穿针产生了最大刚度,其分别可对抗接近 45 N/mm 的屈伸应力及 190 N/mm 的内外翻应力,优于其他固定构型。对比 2 枚交叉针与 2 枚外侧针时,结果发现 2 枚交叉针在对抗旋转载荷时较为稳定,2 枚外侧针在对抗水平载荷时较为稳定。表 2。

当在低位针经过 ONC 的中 1/3 构型的基础上加上第 3 根针,在所有方向上的稳定性都显著提高。在 3 根针固定的构型中,3 枚交叉针的稳定性总体上最好。其在冠状面上的稳定程度及在旋转载荷下的稳定性是其他构型的 3 倍,在矢状面上的稳定程

度是其他构型的 2 倍(表 3)。其余 2 种构型中,第 3 根针打在肱骨外侧柱构型稳定性仅在矢状面载荷下较第 3 根针穿过鹰嘴窝构型好。

当 3 枚针构型同最稳定的 2 枚针构型相比较时,3 枚交叉针构型的稳定性在各个方向都是最好的。其次,第 3 根针穿过鹰嘴窝及低位针经过 ONC 的中 1/3 构型分别在对抗屈伸载荷,内外翻载荷和 2 枚交叉针构型 4 在抗旋转载荷的稳定性较好。在 2 枚针的构型中,低位针经过 ONC 的中 1/3 构型在抗压力载荷时稳定性较好,2 枚交叉针构型 4 在抗旋转载荷时的稳定性是最好的(表 3)。

针的应力分析显示在所有固定构型中克氏针承受的压力主要集中在骨折线周围,在抗压力载荷试验中,除了 2 枚交叉针构型 4 和构型 5 外,交叉克氏针固定构型中针的最大应力出现在外侧针上。然而,在抗旋转载荷试验中,克氏针的最大应力都出现在内侧针上。表明内侧针在维持旋转稳定性中起着至关重要的作用。因此,其在旋转载荷下更容易发生针的松脱。在外侧针固定构型中,低位针克氏针上的应力较大,表明 2 枚外侧针固定构型中,低位克氏针的作用较为重要,所以其也较容易发生松脱。

### 3 讨论

#### 3.1 新儿童肱骨远端模型构建及特点

通过计算机模拟有限元分析的生物力学研究,

表 2 2 枚针固定构型在压力载荷和旋转载矩下稳定性的比较

Tab.2 Comparison of stability of 2-pin configurations in compressive load and rotation tests

应力方向	交叉针构型 5	交叉针构型 4	交叉针构型 3	交叉针构型 2	交叉针构型 1	经骨化中心中 1/3 的外侧针构型	经骨化中心后 1/3 的外侧针构型	经骨化中心后方的外侧针构型
屈曲(N/mm)	18.313	18.416	13.390	6.625	14.486	45.561	11.921	9.922
伸直(N/mm)	17.741	17.756	12.680	6.269	13.651	45.155	11.360	9.370
外翻(N/mm)	117.714	117.444	78.797	31.191	25.606	190.601	80.487	39.122
内翻(N/mm)	118.077	117.840	78.976	31.537	25.960	190.079	80.186	39.406
内旋(Nmm/°)	2 298.623	2 475.691	1 423.572	173.803	224.411	1 144.406	405.957	274.382
外旋(Nmm/°)	2 299.002	2 585.165	1 380.466	172.334	239.203	1 260.758	415.056	270.382

表 3 3 枚针构型同最稳定的 2 枚针构型在压力载荷及旋转载矩下的比较

Tab.3 Comparison between 3-pin configuration and the best 2-pin configuration in compressive load and rotation tests

应力方向	3 枚交叉针构型	第 3 根针打在肱骨外侧柱的 3 枚外侧针构型	第 3 根针穿过鹰嘴窝的 3 枚外侧针构型	2 枚交叉针构型 4	经骨化中心中 1/3 的 2 枚外侧针构型
屈曲(N/mm)	197.768	55.068	65.541	18.416	45.561
伸直(N/mm)	198.364	54.603	65.095	17.756	45.155
外翻(N/mm)	395.467	263.287	209.167	117.444	190.601
内翻(N/mm)	394.001	262.458	209.355	117.840	190.079
内旋(Nmm/°)	6 251.147	1 258.933	1 418.002	2 475.691	1 144.406
外旋(Nmm/°)	6 198.679	1 500.842	2 030.987	2 585.165	1 260.758

能够对骨结构的稳定性及功能有较好的洞察,所以可以用此来对各种克氏针固定术的稳定性进行比较,这是目前其他方式所不能做到的<sup>[3]</sup>。但是,以往儿童骨折的有限元分析利用的仅仅是合成的骨模型<sup>[17]</sup>。成人肱骨末端及儿童肱骨末端在解剖学上的显著不同将不可避免的影响研究结果的临床可信性。本研究通过最新的软件系统,利用 CT 图像数据重建了 1 名 6 岁男孩的肱骨远端模型,在该模型中,重建了儿童所特有的肱骨远端软骨部分及肱骨小头骨化中心部分来进行有限元分析测试。

### 3.2 2 枚交叉克氏针出口高度对固定稳定性的影响

在交叉克氏针固定的构型中,当针的出点在 MDJ 区域上缘附近时,能够获得最好的稳定性。这种优越性最能体现在抗旋转能力上。已有报道称在骨折线周围恰当的针分布可以影响克氏针固定的稳定性<sup>[16]</sup>。本研究结果发现交叉克氏针固定克氏针出口位于 MDJ 区域的上缘时,在骨折线周围可以获得理想的克氏针分布,并获得最好的固定稳定性。由此,可认为交叉克氏针固定时进针点、出针点及针的路径通过影响骨折线周围针的分布而影响固定的稳定性。

### 3.3 2 枚外侧针固定的稳定性比较

外侧克氏针固定时,当有 1 枚针通过 ONC 时,外侧针固定的稳定性在各个方向上均有显著提升,外侧针入针点及针道对整体的稳定性影响较大。该研究结果同 Sirkumaran 等<sup>[7]</sup>的一致。笔者认为当入针点在 ONC 区域时,该针有很大的机会穿过整根骨,以获得较长的针道及最大的针骨结合区域。而另外两种外侧针固定模型的远端针必须在鹰嘴窝之间穿透然后重新进入肱骨内侧柱,这就会减少骨性针道的长度,因而减少针-骨结合的区域。这在一定程度上可以认为是另两种针固定模型稳定性较差的原因。

### 3.4 交叉同外侧 2 枚针稳定性的比较

本研究利用计算机软件重建带软骨的儿童肱骨模型,并进行三维有限元分析。利用该模型比较了肱骨髁上骨折常见克氏针固定构型的稳定性。许多情况下 2 枚交叉针固定的稳定性并不优于 2 枚外侧针固定,特别是在对抗屈伸、内外翻等水平载荷时,2 枚外侧针的稳定性优于 2 枚交叉针。笔者认为这与不同固定方式时克氏针所承受的应力特点有关,在抗旋转载荷试验中,克氏针的最大应力都出现在内侧针上。这意味着,内侧针在维持旋转稳定性中起着至关重要的作用。所以,在复位稳定的肱骨髁上骨折克氏针固定时,2 枚外侧针固定可作为首选的固定方式;但当远折端存在旋转时,应更倾向于打 2 枚交叉针。

### 3.5 2 枚克氏针与 3 枚克氏针固定的稳定性比较

当在 2 枚外侧针固定的构型中加入另外 1 枚外侧针,其所有方向上的稳定性均有显著提升。当第 3 枚中间针的针道穿过外侧柱时,矢状面上稳定性提升最为显著;而当其穿过鹰嘴窝时,在冠状面及抗旋转上的稳定性提升显著。笔者认为经鹰嘴窝穿针构型稳定性较高的原因可能是因为其针在骨折线上分散程度及 2 根针所形成的 4 层皮质固定所造成的。经外侧柱穿针构型,虽然其针道较长,但受其双皮质固定的构型及其与远端针距离较近的影响,导致其稳定性较差。当第 3 枚针与其他 2 枚形成交叉针固定构型时,固定构型最为稳定,3 枚交叉针固定构型,无论在什么方向的载荷下,其稳定性都显著优于其他 3 枚克氏针固定构型。事实上,3 枚交叉针固定构型在各个方向上的稳定性都明显优于最稳定的 2 枚克氏针固定构型。笔者认为,在对抗屈伸及内外翻方向较为稳定的外侧针固定构型中加入 1 枚内侧针,其在增加抗旋转能力的同时,也增加了外侧针的稳定性。所以,在复位不稳定的复杂髁上骨折时,应选择 3 枚克氏针固定,防止复位丢失的发生。

### 3.6 本研究局限性

尽管应用最新的儿童肱骨远端模型,我们的研究仍然有一些局限性。首先,该模型是从 1 名 6 岁男孩的 CT 图像所得来的,其不能代表所有的肱骨髁上骨折的类型。但是,选择该年龄段的儿童 CT 图像来合成模型是因为儿童肱骨髁上骨折的好发年龄在 6 岁左右。其次,本研究仅评估了较常见的横行骨折类型<sup>[2]</sup>。另一方面,计算机分析也不能完全代表临床环境。不同年龄,不同性别及不同骨折类型的模型也应当重建并分析,并且所得结论也应当在以后的临床观察研究中证实。

本研究揭示了儿童横行肱骨髁上骨折克氏针固定时入针点、出针点、针的数量、针道及构型对固定稳定性的影响。对于复位满意的横行肱骨髁上骨折,2 枚外侧分散针能够提供较好的稳定性;在复位和(或)固定不稳定的情况下建议应用 3 枚外侧针构型。交叉针固定构型在对抗旋转载荷时稳定性较好,且出针点在 MDJ 区域上缘的两枚交叉针构型最为稳定。3 枚交叉针构型在本研究所有构型中最为稳定,如担心 3 枚交叉针有损伤尺神经风险,中间针穿过鹰嘴窝的 3 枚分散外侧针构型可作为替代。

#### 参考文献

- [1] Houshian S, Mehdi B, Larsen MS, et al. The epidemiology of elbow fracture in children: analysis of 355 fractures, with special reference to humerus fractures[J]. J Orthop Sci, 2001, 6(4): 312-315.
- [2] Aarons CE, Iobts C, Chan DB, et al. Repair of supracondylar humerus fractures in children: does pin spread matter[J]. J Pediatr Orthop

- B, 2012, 21(6):499-504.
- [3] Gottschalk HP, Sagoo D, Glaser D, et al. Biomechanical analysis of pin placement for pediatric supracondylar humerus fractures: does starting point, pin size, and number matter[J]. J Pediatr Orthop, 2012, 32(5):445-451.
- [4] 卢先整, 胡长贤, 刘本辉, 等. 手法复位外侧经皮穿针内固定治疗儿童移位肱骨髁上骨折[J]. 中国骨伤, 2012, 25(10):872-874.  
LU XZ, HU CX, LIU BH, et al. Manipulative reduction and lateral percutaneous K-wire fixation for treatment of supracondylar humerus fractures in 128 children[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2012, 25(10):872-874. Chinese with abstract in English.
- [5] Reisoglu A, Kazimoglu C, Hanay E, et al. Is pin configuration the only factor causing loss of reduction in the management of pediatric type III supracondylar fractures[J]. Acta Orthop Traumatol Turc, 2017, 51(1):34-38.
- [6] Sankar WN, Hebela NM, Skaggs DL, et al. Loss of pin fixation in displaced supracondylar humeral fractures in children: causes and prevention[J]. J Bone Joint Surg Am, 2007, 89(4):713-717.
- [7] Srikumaran U, Tan EW, Erkula G, et al. Pin size influences sagittal alignment in percutaneously pinned pediatric supracondylar humerus fractures[J]. J Pediatr Orthop, 2010, 30(8):792-798.
- [8] Xu M, Qu W, Wang Y, et al. Theoretical implications of periacetabular osteotomy in various dysplastic acetabular cartilage defects as determined by finite element analysis[J]. Med Sci Monit, 2016, 22(5):124-130.
- [9] Prashant K, Lakhotia D, Bhattacharyya TD, et al. A comparative study of two percutaneous pinning techniques (lateral vs medial-lateral) for Gartland type III. Finite element analysis of pinning configurations 14 pediatric supracondylar fracture of the humerus[J]. J Orthop Traumatol, 2016, 17:223-229.
- [10] Krusche-Mandl I, Aldrian S, Kottstorfer J, et al. Crossed pinning in paediatric supracondylar humerus fractures: a retrospective cohort analysis[J]. Int Orthop, 2012, 36(9):1893-1898.
- [11] 吕建敏, 林传甫, 兰丽琴. 儿童肱骨髁上骨折保守治疗后发生肘内翻的危险因素分析[J]. 中国骨伤, 2019, 30(5):431-435.  
LYU JM, LIN CP, LAN LQ. Risk factors of cubitus varus in humeral condylar fracture after conservation treatment in child[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2019, 30(5):431-435. Chinese with abstract in English.
- [12] Larson L, Firozabakhsh K, Passarelli R, et al. Biomechanical analysis of pinning techniques for pediatric supracondylar humerus fractures[J]. J Pediatr Orthop, 2006, 26(5):573-578.
- [13] Vlahovic T, Bumci I. Biomechanical evaluation of the value of osteosynthesis in supracondylar fracture of the humerus using Kirschner pins in children[J]. Eur J Pediatr Surg, 2002, 12(6):410-415.
- [14] Pennock AT, Charles M, Moor M, et al. Potential causes of loss of reduction in supracondylar humerus fractures[J]. J Pediatr Orthop, 2014, 34(7):691-697.
- [15] Meng Y, Pak W, Guleyupoglu B, et al. A finite element model of a six-year-old child for simulating pedestrian accidents[J]. Accid Anal Prev, 2017, 98:206-213.
- [16] Xu M, Qu W, Wang Y, et al. Theoretical implications of periacetabular osteotomy in various dysplastic acetabular cartilage defects as determined by finite element analysis[J]. Med Sci Monit, 2016, 22:5124-5130.
- [17] Lamdan R, Liebergall M, Gefen A, et al. Pediatric supracondylar humerus fractures: effect of bone-implant interface conditions on fracture stability[J]. J Child Orthop, 2013, 7(6):565-569.

(收稿日期:2019-11-04 本文编辑:李宜)