

# 儿童肱骨髁上骨折残留移位复位模型：力学响应的有限元分析

陈林威, 赵京涛, 郑挺渠, 何昌强, 孙汉桥, 黄枫, 郑晓辉, 甘燕群(广州中医药大学第一附属医院一骨科, 广东省广州市 510405)

## 文章亮点:

- 1 课题在实验设计上有所创新, 依据临床经验及肱骨远端骨折块移位程度设置不同的实验组, 分别探讨和对比骨折端不同区域的力学响应情况, 实验在之前同类研究的基础上有新发现。
- 2 实验在一定程度上验证了肱骨髁上骨折治疗的经验法则, 对骨折复位及固定后复查有一定的参考和指导意义。
- 3 基于有限元的材料仿真实验在方法学上存在一定的简化, 无法完全模拟及反映人体真实的生物力学环境。

## 关键词:

植入物; 骨植入物; 有限元分析; 肱骨髁上骨折; 残留移位

## 主题词:

有限元分析; 肱骨; 骨折

## 摘要

**背景:** 远端骨折块的移位是造成儿童肱骨髁上骨折治疗后肘内翻畸形发生的原因之一, 临床治疗时多强调纠正后尺侧偏移, 复位经验是否具有力学上的优势, 缺乏现有的实验依据。

**目的:** 建立伸直尺偏型肱骨髁上骨折有限元模型, 探讨骨折复位后存在功能复位标准范围内残留移位情况下骨折端的力学响应情况, 以此为“宁前勿后, 宁桡勿尺”的复位经验法则提供力学证据。

**方法:** 选择新鲜 7 岁儿童右上肢尸体骨一副进行 CT 扫描, 建立残留移位骨折复位有限元模型, 再根据骨折块移位的方向和接触面积的大小分组进行外力加载, 记录骨折端面前后缘应力值及 Baumann 角, 分析对比数据。

**结果与结论:** 后内侧移位下后侧缘应力值显著增高, 后侧移位组次之, 接触面积为 75% 时应力值显著高于其他组; 前侧缘应力值对比中, 前内侧移位与其他组应力值差异有显著性意义, 85% 接触面积下应力值普遍较高; 前后侧缘应力对比示后侧移位时应力增幅明显高于前侧移位, 内侧移位时载荷后 Baumann 角显著增高。提示移位方向改变应力集中的区域, 相比较而言, 后方移位下应力增量更加显著, 骨折端接触面积减少, 相应统计区域的应力明显升高, 远端骨折块正内侧移位显著改变 Baumann 角, 实验结果在力学上支持肱骨髁上骨折远端骨折块移位的假说, “宁前勿后, 宁桡勿尺”的复位经验原则有一定力学上的依据。

陈林威, 赵京涛, 郑挺渠, 何昌强, 孙汉桥, 黄枫, 郑晓辉, 甘燕群. 儿童肱骨髁上骨折残留移位复位模型: 力学响应的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(13):2125-2132.

doi:10.3969/j.issn.2095-4344.2015.13.029

## Model of reduced pediatric supracondylar humeral fracture with residual displacements: a finite element analysis of mechanical responses

Chen Lin-wei, Zhao Jing-tao, Zheng Ting-qu, He Chang-qiang, Sun Han-qiao, Huang Feng, Zheng Xiao-hui, Gan Yan-qun (Department of Orthopedics, First Affiliated Hospital, Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, Guangzhou 510405, Guangdong Province, China)

## Abstract

**BACKGROUND:** Displacement of the distal fracture fragment is one of the most important facts that lead to cubitus varus following pediatric supracondylar humeral fracture. Mainstream technique emphasized the restoration of posterior-ulnar deviation of the distal fragment. However, there is an absence of supportive evidences from biomechanical studies.

**OBJECTIVE:** To establish models of extension-ulnar type of supracondylar humeral fracture and investigate the mechanical stability of reduced fracture with residual displacements within functional restoration standard, so as to provide mechanic evidences supporting the empirical rule of manipulative reduction-“better anterior than posterior, better radial than ulnar”.

**METHODS:** The fresh cadaveric bone of right upper extremity from a 7-year-old child was scanned using CT. Models of supracondylar humeral fracture differing in contact area of the fracture site and displacement direction of the distal fragment were established and underwent loading tests. Stress in both anterior and posterior margin of the fracture site and Baumann angle were recorded, and data were analyzed and compared.

**RESULTS AND CONCLUSION:** In comparison of stress in the posterior margin, the value was significantly greater in the posteromedial-displacement group than the others. Stress value in fracture with 75% contact area was significantly greater than the other three groups. In comparison of stress in the anterior margin, a significantly

陈林威, 1987年生, 福建省泉州市人, 汉族, 2014年广州中医药大学毕业, 硕士, 医师, 主要从事四肢创伤研究。

通讯作者: 赵京涛, 硕士, 副教授, 广州中医药大学第一附属医院, 广东省广州市 510405

中图分类号: R318

文献标识码: B

文章编号: 2095-4344

(2015)13-02125-08

稿件接受: 2015-01-16

http://www.crter.org

Chen Lin-wei, Master, Physician, Department of Orthopedics, First Affiliated Hospital, Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, Guangzhou 510405, Guangdong Province, China

Corresponding author: Zhao Jing-tao, Master, Associate professor, Department of Orthopedics, First Affiliated Hospital, Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, Guangzhou 510405, Guangdong Province, China

Accepted: 2015-01-16

greater value was obtained in the posteromedial-displaced group. Stress value in fracture with 85% contact area was significantly greater. When comparing stress in posterior margin and anterior margin, the absolute increment of stress value was greater in posterior displacement group than in anterior displacement group. Baumann angle increased significantly when fragment displaced medially. Above findings indicated that displacement direction altered the location of stress concentration. Stress augmentation was greater in posterior displacement group. Stress in related area significantly increased constantly when contact area of the fracture site reduced. Baumann changed obviously when fragment displaced medially. The results preliminarily verify the hypothesis that displacement of the distal fragment was the main contributor to cubitus varus following supracondylar humeral fracture. These findings provided certain evidences supporting the empirical rule "better anterior than posterior, better radial and ulnar".

**Subject headings:** Finite Element Analysis; Humerus; Fractures, Bone

Chen LW, Zhao JT, Zheng TQ, He CQ, Sun HQ, Huang F, Zheng XH, Gan YQ. Model of reduced pediatric supracondylar humeral fracture with residual displacements: a finite element analysis of mechanical responses. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2015;19(13):2125-2132.

## 0 引言 Introduction

儿童肱骨髁上骨折是临床最为常见的上肢骨折之一, 临床报道其占儿童全身骨折的10%<sup>[1-2]</sup>, 肘部骨折的75%<sup>[3]</sup>, 90%的病例为伸直型骨折<sup>[4]</sup>, 对于Gartland I型和移位较轻的Garland II a型骨折, 手法复位配合外固定治疗仍然十分普遍, 相关研究示治疗效果满意<sup>[5-6]</sup>。

肱骨髁上骨折保守治疗后最常见的并发症为肘内翻畸形, 临床报道其发生率为3%–57%<sup>[7-8]</sup>, 发生率的高低受骨折类型和治疗方案的影响, 长久以来肱骨髁上骨折后肘内翻发生的机制一直是争论的焦点, 大部分学者认为骨折端对位不良、即远端骨折块的移位是造成肘内翻发生最主要的原因<sup>[9-11]</sup>, 一般而言, 远折端的移位主要指的是骨块的尺偏和尺倾, 骨折块的尺侧偏移将造成肌力及重力合力作用点的内移, 桡侧受张力分离, 尺侧受压应力而尺倾, 致使肘关节的携带角逐渐减小而形成肘内翻<sup>[12-13]</sup>。

有学者认为, 远端骨折块的尺侧倾斜及尺侧移位可能在复位后即已存在<sup>[14-16]</sup>, 纯粹手法复位操作很难做到完全恢复骨折端的解剖关系, 所以临床上常采用功能复位标准来判断骨折端对合是否合格, 考虑到有相当部分的肘内翻畸形病例并没有在治疗及复查期间被及时发现, 而是在创伤后多年内逐渐形成, 当肱骨髁上骨折经复位后残留功能复位标准内的移位时, 骨折端是否仍存在力学上的不稳定性, 目前缺乏相关研究。

临床治疗报道中, 大部分医家强调手法复位肱骨髁上骨折时, 应适当“矫枉过正”, 尤其针对占绝大多数的伸直型骨折, 遵循“宁前勿后, 宁桡勿尺”的复位原则, 有利于减少肘关节屈伸活动受限和肘内翻畸形的发生, 运用这一原则指导手法复位临床报道治疗结果良好<sup>[17-18]</sup>, 但“矫枉过正”目前只停留在经验总结之上, 缺少力学上的证据支持。

为了明确以上问题, 需对肱骨髁上骨折骨折端的力学稳定性进行研究, 近年来随着数字医学的发展, 有限元分析方法在骨科领域得到了广泛使用<sup>[19-22]</sup>, 数字化三维重建技术能够更直观地显示人体组织结构, 且无需对人体进行有创性操作, 可很好地从生物力学角度对骨关节损伤机制

及治疗方案进行深入研究。

基于以上所述, 实验旨在通过建立伸直尺偏型肱骨髁上骨折有限元模型并分析骨折端对外力载荷的响应情况, 探讨肱骨髁上骨折复位后存在复位标准范围内残留移位的情况下, 骨折端的力学稳定性, 以此为“宁前勿后, 宁桡勿尺”的经验法则提供一定的力学证据。

## 1 材料和方法 Materials and methods

**设计:** 三维有限元分析。

**时间及地点:** 于2013-09-01至2014-06-30在广州中医药大学骨科国家级重点实验室及广州中医药大学第一附属医院完成。

**材料:** 选择新鲜7岁儿童右上肢尸体骨标本一副, 所用标本由广州中医药大学解剖实验室提供并保存。采用东芝64排螺旋CT机对本标本进行薄层扫描, 扫描条件为: 电压120 kV, 电流120 mA, 矩阵512×512, 图像层厚为1 mm, 共获取961层数据。扫描所得图像以DICOM格式保存, 文件容量为482 MB, 实验采用Mimics 14.0、Solidworks 2012及Abaqus 6.12完成有限元分析, CoreIDRAW X6对截图画角并测量角度, SPSS 19.0进行数据收集和分析, 工作站运行 windows 7 64位系统(Intel® core i7-3770 CPU 3.40 GHz, 32.0 GB RAM, NVIDIA GeForce GTX660)。

**方法:**

**骨组织建模:** 使用Mimics按CT序列号自动读入全部图像, 默认原始三维立体坐标系, 依据CT灰度阈值156-1 626  $\overline{Hu}$  提取上臂骨组织, 以区域增长、擦除和布尔逻辑等操作截取肱骨远端(包括肱骨小头及骨骺低灰度区域), 计算得到三维实体模型, 进行高斯运算光滑处理后, 采用Mimics自带3-matic程序进行自动网格划分及优化, 网格为Solide92、10节点四面体单元, 本次试验将肱骨远端骨组织视为各向同性、不均匀的材料, 按照灰度值跨度分为10层, 密度与灰度值转换公式参考Rice等<sup>[23]</sup>介绍的方法:

$$\rho = \begin{cases} 1.9 \times 10^{-3} \times \overline{Hu} + 0.105 & \overline{Hu} \leq 816 \\ 7.69 \times 10^{-4} \times \overline{Hu} + 1.028 & \overline{Hu} > 816 \end{cases}$$

由骨密度计算弹性模量的公式摘自Morgan等<sup>[24]</sup>的试验:  $E = 6.950 \times \rho^{1.49}$ , 泊松比取值0.3<sup>[25]</sup>, 将之前建立的肱骨远端三维实体模型的点云图导入Solidworks进行各实验组不同程度残留移位下接触面积计算、定位后记录位移坐标, 利用Abaqus分别将肱骨骨折近端、骨折远端及前臂双骨部件导入, 依据Solidworks计算坐标装配各不同移位组模型, 通过前臂双骨纵轴确定外力加载方向并进行载荷分析。

**骨折线的划分:** 本次研究对象为伸直尺偏型肱骨髁上骨折, 相对于一般的骨折形态, 伸直尺偏型骨折往往表现为远端骨折块向背侧及尺侧偏移(见**图1**), 根据Bahk等<sup>[26]</sup>描述, 骨折线在正位片上一侧倾斜超过 $10^\circ$ , 侧位片上倾斜超过 $20^\circ$ , 即可称为斜型骨折, 本次实验模拟伸直尺偏型骨折, 在已建成模型上根据这一标准划出骨折线, 骨折线在外上髁区域平鹰嘴窝中点, 内上髁区域稍呈弧形上扬, 侧面看由前下向后上延伸。如前述, 实验在截取肱骨远端图像后, 依据预期骨折线的走向分别再擦取骨折远端及近端mask, 通过Mimics自带工具测量骨折面冠状面及矢状面倾斜度, 反复操作直到骨折模型符合要求。

**实验组设置:** 依据远端骨折块移位的方向建立4个组, 分别为前内侧 $45^\circ$ 位移、内侧位移、后内侧 $45^\circ$ 位移和后侧位移, 每个移位方向依据骨折块间接触面积占完全对位时接触面积的百分比, 分别再设置3个亚组(75%, 85%和95%接触面积), 因此, 实验共建立12个移位模型, 用于模拟功能复位标准下不同程度的残留移位, 同时设置骨折端完全对合的模型作为对照组, 见**图2**。

**应力加载:** 进行应力加载前对已建立的模型进行验证, 所得数据与体外力学实验结果作对比, 模型验证有效后, 将骨折两端的接触面则设置为面-面滑动摩擦, 间隙约为0.1 mm, 规定骨折两端不可相互侵入, 骨折块接触力的法向分量只能是压力, 切向接触满足库仑摩擦法则, 摩擦系数 $\mu$ 为0.4<sup>[27]</sup>。参照Schuster等<sup>[28]</sup>的实验, 采用逐步加力法, 依次加载100, 200和500 N, 方向以肘关节自然伸直时前臂纵轴为准, 将施加于肱骨远端力的60%分配在肱尺关节, 40%分配在肱桡关节。

**数据收集:** 实验的观察指标为骨折端的应力及位移, 应力值测量点为各组肱骨内上髁骨折接触面前侧缘和后侧缘, 实验将骨折端分为前后2个区域分别探讨是因为预实验发现应力集中的位置因远端骨折块移位方向的不同而有所改变(**图3**), 合并计算平均应力值无法反映其中的变化, 采集应力值时需设定同一的截面, 定位在骨折面水平内外侧皮质间距离的中内1/3交界点, 选择这个位置的原因为载荷后应力云图示该截面为主要的应力集中区域(**图3**), 在前后两个区域分别随机取10个单元的数值并计算平均数, 实验通过测量肱骨远端Baumann角大小反映远端骨折块的位移程度, 测量时在前后位截图, 截图前将变形缩放系数设为1, 避免夸张形变, 选取肱骨小头基底部两个固定的节点

以确定骨垢线的位置(**图4**), 截取后分别由实验组5名成员利用软件测量角度并取平均值。

**主要观察指标:** 建立残留移位骨折复位的有限元模型, 根据骨折块移位的方向和接触面积的大小分组进行外力加载, 记录骨折端面前后缘应力值及Baumann角。

**统计学分析:** 采用two-way ANOVA评估移位方向和接触面积对前后侧缘应力值及Baumann角的影响, 外力载荷作为随机因子参与主效应检验, 事后分析采用Turkey模型, 主效应间相互作用显著时则采用one-way ANOVA经行多重组间对比, 载荷后的Baumann角平均值同时并作图比较, 所有数值保留小数点后两位,  $P$ 取值0.05。

## 2 结果 Results

**2.1 模型建立** **图5**为建模过程, 实际建成肱骨远端有限元模型共含有四面体单元 89 252 个单元, 48 752 个节点。

**2.2 模型验证** 在体外尸体骨实验中, Dunham等<sup>[29]</sup>对肱骨远端骨组织的力学性能进行了测试, 按照其描述的分层和取值方法, 本次实验所建有限元模型相应分层应力加载结果与Dunham等提供数据对比见**图6**, Dunham等研究的对象为成人骨, 载荷-位移曲线反映骨材料具有一定的弹塑性, 且弹性阶段线斜率高于本实验模型, 本次实验模型所用CT图像来自于儿童, 材料赋值时设定为不均质弹性, 所得曲线斜率较一直, 弹性模量略低于Dunham实验, 总体而言本次实验所建立的模型在材料属性上与真实情况贴近, 能够反映肱骨远端骨组织加载后的响应特征, 可以用于下一步的生物力学分析。

**2.3 后侧缘应力** 方差齐性检验示差异无显著性意义( $P=0.09$ ), 可进行下一步方差分析, 主效应检验结果示移位方向、接触面积的主效应及它们之间交互作用对骨折端后侧缘应力值影响显著( $P < 0.01$ ), 事后检验示骨折端后侧缘的平均应力由大到小排列依次为: 后内侧移位、后侧移位、前内侧移位、无移位及内侧移位, 其中后内侧移位下应力值显著高于其余4组( $P < 0.01$ ), 其余4组组间对比差异均无显著性, 当接触面积为75%时, 骨折端后侧缘的应力值显著增高( $P < 0.01$ ), **表1**示多重组间比较结果与事后检验相符, 同移位方向内比较, 接触面积小者应力值大, 同接触面积下比较, 后内侧移位组应力值大, 应力高值出现在75%接触后内侧移位组, 75%接触后侧移位组次之, 此两组应力值与其他各组相比差异存在显著性意义, 其余组间对比差异基本无显著性意义。

**2.4 前侧缘应力** 方差齐性检验示无显著性( $P=0.36$ ), 主体效应检验中移位方向、接触面积的主效应及它们之间交互作用对骨折端前侧缘应力值影响显著( $P < 0.01$ ), 事后检验示前内侧移位、内侧移位、后内侧移位、后侧移位及完全复位下骨折端前侧缘应力值逐渐降低, 方向刚好与后侧缘应力值结果相反, 对比下前内侧移位与后内侧移位、完全复位应力值差异有显著性意义, 接触面积比较结果呈现



图 1 伸直尺偏型肱骨髁上骨折 X 射线片及绘制图  
Figure 1 X-ray plain film and sketch of humeral supracondylar fracture with ulnar deviation

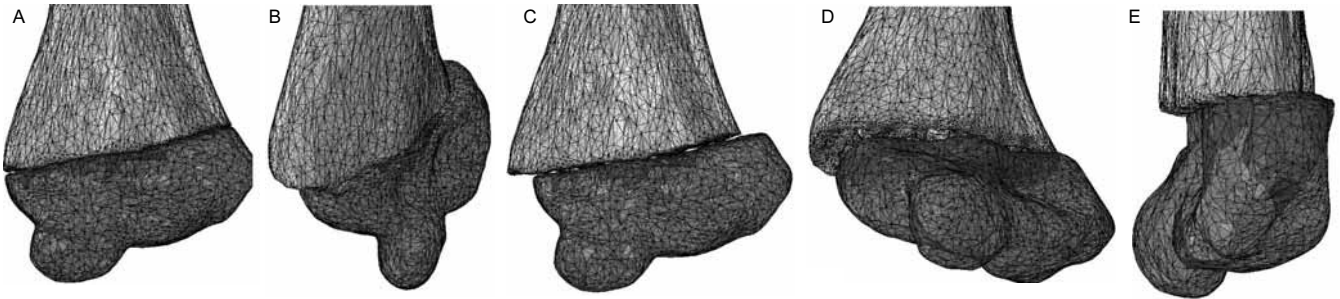


图 2 残留移位复位有限元模型  
Figure 2 Finite element models of reduced fractures with residual displacement  
图注: 图 A 为无移位模型; B 为前内侧 45° 移位模型; C 为内侧移位模型; D 为后内侧 45° 移位模型; E 为后侧移位模型。

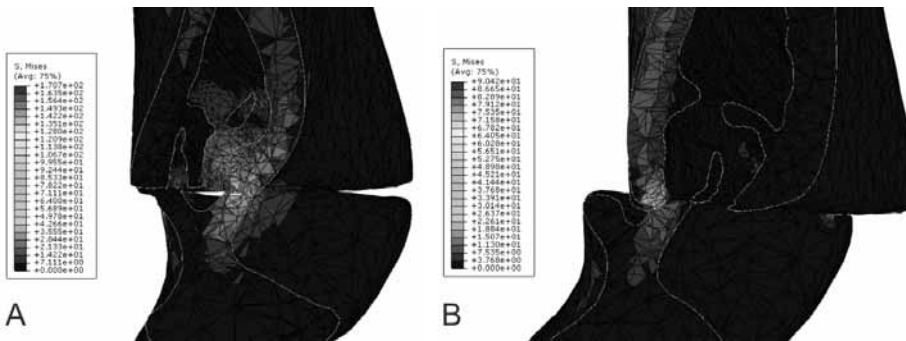


图 3 模型应力云图内上髁截面  
Figure 3 Sectional stress nephograms of the medial epicondyle  
图注: 图 A 为远端骨折块后内侧移位下, 骨折端后侧缘应力升高; B 为远端骨折块前内侧移位下, 骨折端前侧缘应力升高。

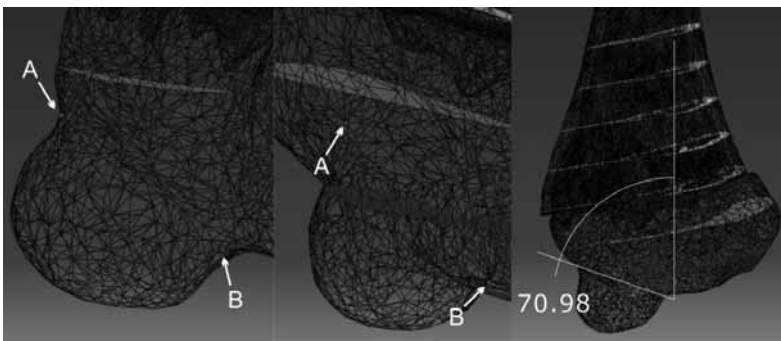


图 4 Baumann 角测量图中 A 与 B 两点为确定骨骺线位置的固定结点  
Figure 4 A and B are the two nodes that were used to determine the position of epiphysis in Baumann angle measurement

表 1 后侧缘应力值多重组间比较

Table 1 Comparison of stress value of posterior edge among groups

项目	(1)75%接触面积	(2)85%接触面	(3)95%接触面积
(1)后侧移位	<sup>b23</sup> 14.18±11.51 <sup>B34</sup>	<sup>a</sup> 7.24±8.18 <sup>A</sup>	<sup>a</sup> 4.88±4.69 <sup>A</sup>
(2)后内侧移位	<sup>b23</sup> 71.75±52.35 <sup>C134</sup>	<sup>a</sup> 5.02±4.30 <sup>A</sup>	<sup>a</sup> 5.68±6.36 <sup>A</sup>
(3)内侧移位	<sup>a</sup> 3.79±3.35 <sup>A</sup>	<sup>a</sup> 4.68±4.22 <sup>A</sup>	<sup>a</sup> 2.63±1.98 <sup>A</sup>
(4)前内侧移位	<sup>b3</sup> 5.43±3.94 <sup>A</sup>	<sup>b3</sup> 6.35±4.81 <sup>A</sup>	<sup>a</sup> 2.72±2.51 <sup>A</sup>

表注: 小写字母为同一行间对比, 大写字母为同列间对比, 字母不同表示存在组间差异, A(a)到 C(c)代表均值依次增大, 字母后的数字代表均值显著高于的对象组。

表 2 前侧缘应力值多重组间比较

Table 2 Comparison of stress value of anterior edge among groups

项目	(1)75%接触面积	(2)85%接触面	(3)95%接触面积
(1)后侧移位	<sup>a</sup> 3.13±2.22 <sup>B3</sup>	<sup>a</sup> 4.05±3.89 <sup>A</sup>	<sup>a</sup> 2.39±1.90 <sup>A</sup>
(2)后内侧移位	<sup>a</sup> 2.77±2.27 <sup>A</sup>	<sup>b1</sup> 7.00±4.69 <sup>AB</sup>	<sup>b1</sup> 7.40±5.02 <sup>B1</sup>
(3)内侧移位	<sup>a</sup> 1.57±1.56 <sup>A</sup>	<sup>c</sup> 15.54±20.54 <sup>B1</sup>	<sup>b</sup> 4.83±3.46 <sup>B1</sup>
(4)前内侧移位	<sup>b3</sup> 14.75±10.76 <sup>C123</sup>	<sup>b3</sup> 9.51±7.11 <sup>B1</sup>	<sup>a</sup> 5.21±3.93 <sup>B1</sup>

表注: 小写字母为同一行间对比, 大写字母为同列间对比, 字母不同表示存在组间差异, A(a)到 C(c)代表均值依次增大, 字母后的数字代表均值显著高于的对象组。

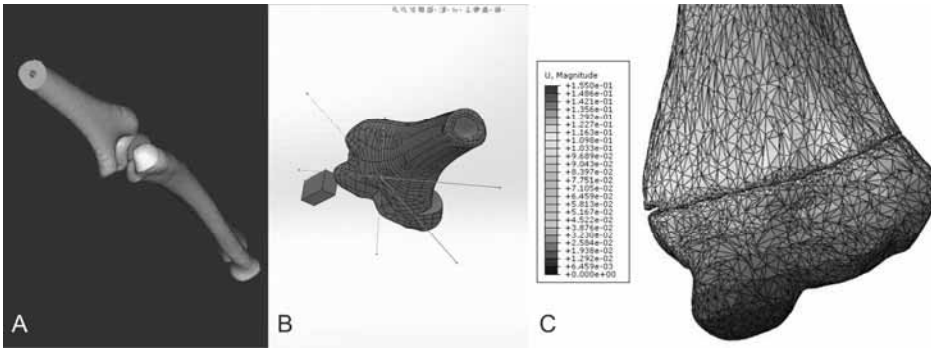


图5 肱骨远端有限元模型的建模过程  
Figure 5 Establishment process of finite element model of the distal humerus  
图注: 图A为 Mimics 堆砌3D 实体模型; B为 Solidworks 测量接触面积记录位移坐标; C为 Abaqus 受力作业后应变云图。

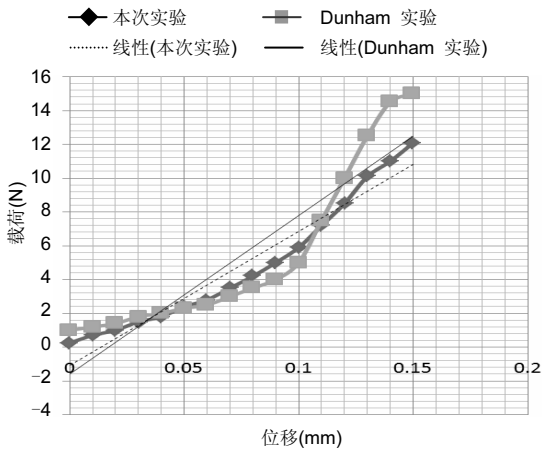


图6 肱骨远端横切片模型载荷实验及模验证结果  
Figure 6 Loading test to the transverse slice of the distal humerus and the results of model validation  
图注: Dunham<sup>[29]</sup>的体外实验数据(基于真实的弹性骨性材料)曲率略大于本次实验(简化后的线弹性材料), 无数数据点的2条直线代表曲线斜率, 对比示斜率趋势相近, 建模有效。

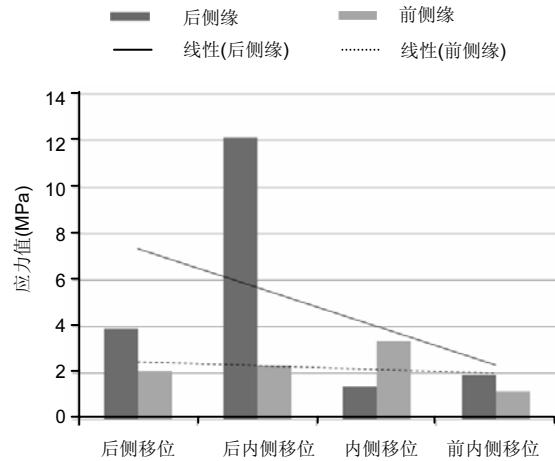


图7 骨折端前后侧缘应力对比  
Figure 7 Comparison in stress value between anterior margin and posterior margin of the fracture site  
图注: 直线代表两组数据的变化趋势, 后侧缘的应力值改变幅度显著高于前侧缘应力斜率明显, 各组前侧缘应力值相比相差不大。

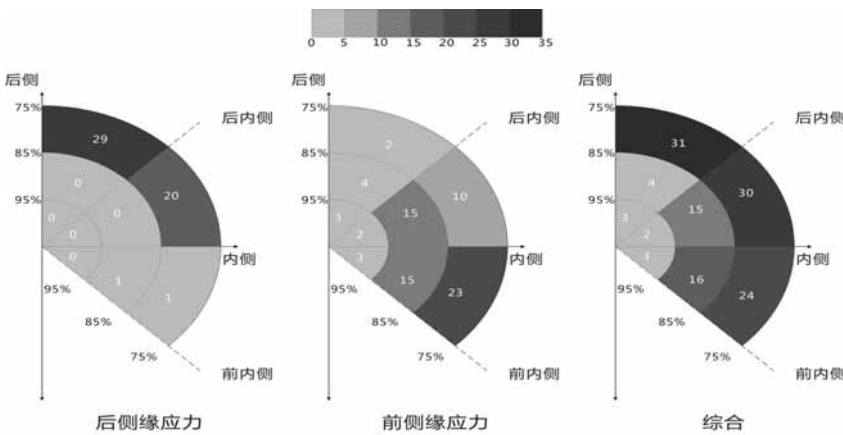


图8 骨折端应力值分布  
Figure 8 Stress distribution at the fracture site  
图注: 后侧缘应力(左), 前侧缘应力(中)和综合前后侧应力(右)分布区域图, 图示骨折块后内侧移位时, 骨折端后侧缘应力值显著增高(颜色加深区域集中), 骨折块前内侧移位时, 前侧缘应力虽有增高但幅度平缓(颜色浅且分布较均匀), 综合后示后内侧移位仍是导致骨折端应力集中的危险因素。

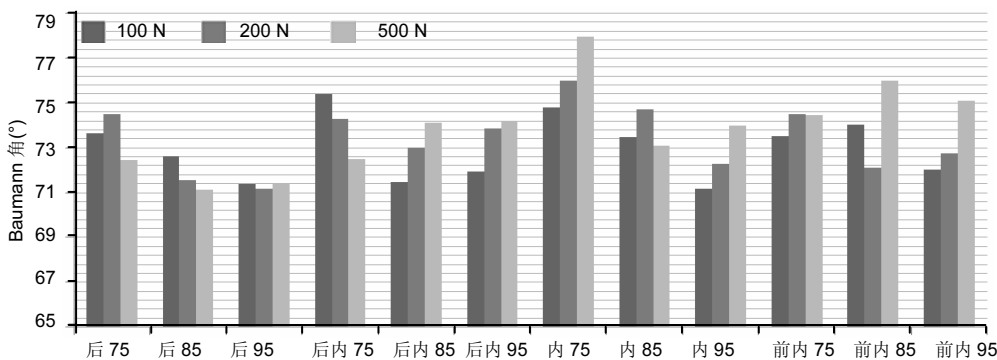


图9 各模型载荷后的Baumann角  
Figure 9 Baumann angle of each model after loading  
图注: 图中实验组模型编号由移位方向(文字)和对位面积(数字)组成。在接触面积较少(75%), 外力较大的情况下, 3个组(后内75, 内75和前内85)的Baumann角增大明显, 纯后侧移位的3个组Baumann角改变不大。

出双向性, 85%接触面积下骨折端前侧缘应力值显著高于75%、95%接触面积和完全复位组, 后3组相互比较差异无显著性意义, 表2为多重组间比较结果, 同移位方向下比较, 接触面积减小并不一定增大应力值, 相较而言, 85%接触面积下应力值普遍较高, 相同接触面积下比较, 前内侧及内侧移位组应力值较大, 应力最高值出现在85%内侧移位及75%前内侧移位。

**2.5 前后侧缘应力对比** 如图7所示为100 N载荷下骨折端前侧缘与后侧缘在各移位方向上平均应力值的对比, 由图可看出, 远折端向后侧移位时, 后侧缘应力的增加趋势较为显著, 且增加幅度明显高于前侧移位时前侧缘应力的增幅, 趋势线示前侧缘应力值在各个方向移位时变化相对趋于平稳(图中虚线), 而后侧缘应力趋势线则存在明显斜率, 方差分析结果亦可看出远端骨折块移位虽对前侧缘应力值的分布有影响, 但其影响程度不如后侧缘应力值, 前侧缘各组应力值增量绝对值明显小于后侧缘应力值的增量。

**2.6 应力值分布区域图** 图8为骨折端应力值区域图, 可更直观地反映实验所得应力值的组间差异程度及分布, 图中由内至外3个圆弧分别代表3种接触面积, 直线代表移位方向, 则图中圆弧与直线的交点即为本次实验所设置的各项实验组, 每个点(组)根据多重比较的结果计算得分(在行及列中具有显著性高应力值则加分, 并依据对比产生显著性的组数进行得分累积, 加分标准为组间差异绝对值在0-5之间得1分, 5-10之间得2分, 10-20之间得3分, 20以上得4分), 图中各区域内分数为包围其各点分值的总和, 计算完成后依据各区域内总分的跨度对区域上色, 由图可看出, 后侧缘应力高值分布很集中(后侧及后内侧), 且应力值增加幅度明显较大, 前侧缘应力高值分布分散(前内、内侧及后内侧区域), 应力值增幅不高, 综合后可见95%圆弧内的区域为相对低应力值区。

**2.7 Baumann角** 方差分析示差异无显著性意义( $P=0.12$ ), 主体效应检验示移位方向、接触面积对Baumann角影响显著( $P < 0.01$ ), 两因素之间交互作用无显著性( $P=0.65$ ), 移位方向两两比较结果示后侧移位下Baumann角显著低于其余各组, 后内侧移位, 内侧移位及前内移位组间对比结果无显著性, 接触面积两两对比示75%接触面积下Baumann角显著高于其他两组, 后两组间对比差异无显著性意义, 图9为各模型载荷后Baumann角的最终值, 根据徐华梓等<sup>[30]</sup>的论述, Baumann角与Carry角有显著的负相关性( $r=-0.308$ ,  $P < 0.01$ ), 在此取Baumann角与Carry角比率为1:2, 根据一般肘内翻标准换算得Baumann以75°为正常值上限, 大于81°可考虑肘内翻高风险, 这与相关研究推荐阈值相符<sup>[31-33]</sup>, 由图可看出, 没有任何一个模型在载荷后Baumann角达到危险值, 正内侧移位组载荷后Baumann角普遍偏高, 其最终值基本都在75°以上, 后侧移位组Baumann角普遍偏小, 其余各组或因接触面积小或因外力载荷大, 移位后

Baumann角都有不同程度增大, 偶可达到或超过正常上限, 需注意的是, 同一移位模型内对比可发现, Baumann角的改变与外力值的增减没有必然的正负相关关系, 尤其是后侧移位组, 3个模型在加载外力不同时最终产生的Baumann角改变趋势各不相同。

### 3 讨论 Discussion

目前有关肱骨髁上骨折的有限元分析多限于内外髁两个大区域平均应力及应变值的直接对比<sup>[34-38]</sup>, 内上髁包括了鹰嘴窝及冠状窝所在的肱骨远端中间柱结构, 是形态学结构改变及应力集中发生的区域, 单纯以内外髁为区域界限平均各点的应力值有可能削弱实验组间的差异性, 本次实验在测量应力值时将内上髁在矢状面上分成前后两个区域, 额状面上截至内上髁内侧, 并固定坐标点进行单元格定位, 有利于探讨不同外部条件下骨折区应力分布的改变情况, 同时, 本次实验只纳入伸直型尺偏型肱骨髁上骨折类型, 所得实验结果更有针对性。

如前述, 远端骨折块的偏移方向对骨折端应力值的影响主要在于应力集中的区域, 远折端后方移位增大后侧缘的应力值, 前方移位则增大前侧缘的应力值(如图3), 相比较而言, 后方移位下这种改变趋势更加明显, 说明远端骨折块的后侧偏移残留移位对骨折端应力影响更大, 这与多数学者提倡临床复位时需完全纠正骨折后方移位相符, 考虑到伸直型肱骨髁上骨折远端骨折块多数向后上方移位, 在手法复位时完全纠正矢状面上背侧的残留移位并维持复位后位置是十分必要的, 同时, 事后分析结果提示复位时必须避免同时存在远端骨折块的后侧及内侧移位, 后内侧同时存在偏移对骨折端应力值的加成远大于单纯一个方向的移位。诚然, 纠正后侧偏移固然重要, 但应力区域图提示前侧移位亦有广泛的影响, 虽然影响程度不及后侧移位, 实际复位时强调“勿后”的前提下, “宁前”应谨慎, “宁前”在不得已的情况下是否利大于弊, 需要临床根据具体情况定夺。

对位面积对应力值影响的显著性在于, 无论偏移方向如何, 但凡骨折端对位减少, 则相应统计区域的应力明显升高, 后侧缘应力值计算中, 应力高值集中在对位75%的两个组, 前侧缘应力计算中, 平均应力值最高的组为85%对位组, 但与75%对位及95%对位组差别并不明显, 可能解释为肱骨内上髁在髁上水平面截面为一向前拱且前方宽于后方的结构, 增大残留移位可能反增大骨折端前侧缘的接触面积, 相应的应力值则减小, 但无论是前侧缘还是后侧缘, 接触面积减小都将导致应力集中, 本实验两组数据对比只有95%对位组可同时保证骨折端前后缘应力值没有显著升高, 临床观片时肉眼较难区分75%与85%对位, 在移位方向与对位面积存在交互作用的情况下, 建议骨折复位时无论骨折块偏移方向如何, 应尽可能增加骨折面的接触面积以减小骨折接触面的应力值。

实验中Baumann角的统计结果与现有研究结论相符, 存在内侧移位的3个组在载荷后表现出明显的Baumann角改变, 尤其是正内侧移位时, 无论加载程度如何, Baumann角都高于正常上限, 与此相反的是, 远折端在前后方向上的偏移似乎不能导致明显的Baumann角改变, 存在内侧移位的3个组间Baumann角的对比基本无差异, 而仅向后移位不伴有内侧移位的组Baumann角却明显较小, 徐华梓等<sup>[30]</sup>认为, 远端骨折块在三维状态下常见的移位有内倾、屈曲和旋转, 其中远端内倾对Baumann角影响最大, 屈曲次之, 旋转最小, 这可以解释本次实验中骨折块在矢状面的偏移未明显改变Baumann角, 同时进一步肯定了, Baumann角对远折端内移的敏感性。Baumann角预测肱骨髁上骨折肘内翻畸形的准确性已经得到实验和临床的验证<sup>[39-40]</sup>, 因此, 就位移而言, “勿尺”原则有一定的力学根据和临床预见性。

综上, 本次实验在力学上初步验证了远端骨折块移位的假说, 远端骨折块内侧移位对骨折端前后缘应力值及Baumann角的影响显著, 后侧偏移相较前侧偏移对应力集中有更明显的加强作用, 结合肱骨髁上区域解剖及骨折的特点, 复位儿童伸直尺偏型肱骨髁上骨折时应最大程度避免尺偏及后方移位, 完全纠正骨折端对位面积, 必要时宁可适当“矫枉过正”。因此, 通常情况下的四肢功能复位标准无法完全适用于肱骨髁上骨折, 针对伸直尺偏型骨折亚型, 在矢状面上, 适当的掌侧偏移要优于背侧偏移, 对于骨折线在内髁部存在倾斜的病例, 适当地做桡侧成角是可行的。

无论是保守治疗还是手术治疗, 闭合复位骨折端都是首选操作, 手法复位的目的在于纠正骨折端的偏移、旋转, 同时提供良好的复位后轴线对位, 以促进骨折愈合, 减少术后并发症, 复位肱骨髁上骨折时, “宁前勿后, 宁绕勿尺”的原则为大多数学者所推崇, 该原则要求稍外展挤压远端骨折块, 使远端骨折块向绕侧嵌插偏移, 甚至可允许尺侧皮质开口<sup>[41-42]</sup>, 本次实验的数据在力学上支持以上结论, 针对伸直尺偏型骨折亚型, 骨折线在尺侧倾斜度大、并向后上延伸, 远折端背移尺偏易增加应力集中及Baumann角的变化, 适当地分离尺侧骨折端, 前移骨折块有利于为骨折修复提供稳定的力学环境<sup>[43]</sup>。

手法复位后肘关节的固定位置亦是业界争论的重点, 通常情况下, 前臂旋前将增加前臂背伸肌群的张力, 随着旋后角度的增大背伸肌群张力降低, 掌屈肌群张力升高, 目前, 有部分学者主张在远端骨折块向尺侧移位时(往往伴有外侧骨膜的撕裂), 应将前臂置于旋前体位固定<sup>[44-45]</sup>, 旋前位时前臂伸展肌群紧张, 压应力集中在外髁区域有利于骨折端向绕侧嵌顿, 减少骨折块向尺侧再移位的趋势, 肘关节90°屈曲固定可更好的维持远端骨折块的矢状面上的位置, 同时不会因过度挤压肘部软组织影响血供及回流。

本次实验存在诸多不足: 首先, 有限元分析是基于临床资料的模拟力学实验, 其结果有一定的参考价值, 但建模及载荷设置过程无可避免地需要对影响因素进行简化以

确保可行性, 因此, 本文所得结论必须经人体标本的生物力学测试验证才能构成更完整的力学证据。其次, 单纯从骨折端残留移位的角度探讨肘内翻的发生机制, 远端骨折块的旋转亦是重要诱发原因之一, 本此实验未能涉及这一方面问题的探讨, 同时远端骨折块的内移与内倾是有区别的, 高光明等<sup>[46]</sup>认为远端骨折端单纯的尺偏并未改变上臂和前臂的轴线关系, 只有尺偏合并尺倾时携带角才会改变, 骨折块的内移在不伴有内倾的情况下是否仍然存在相同的力学不稳定性现不得而知。最后, 本次实验对象仅限于伸直尺偏型骨折, 其他类型的骨折亚型是否有相同的力学特性有待明确。

**致谢:** 感谢广州中医药大学骨科国家重点实验室相关工作人员在有限元软件运用和操作方面的大力支持。

**作者贡献:** 所有作者共同进行实验设计、实施及评估, 数据提取与分析采用盲法评估。

**利益冲突:** 文章及内容不涉及相关利益冲突。

**伦理要求:** 实验方案经过广州中医药大学第一附属医院伦理学委员会批准, 试验中CT数据取自尸体骨标本, 标本由广州中医药大学解剖教研室保存及管理。

**学术术语:** Baumann角—儿童上肢标准正位X射线片上肱骨小头生长板轴线与肱骨干纵轴线之间的夹角, 实际测量时取线方法有多种。

**作者声明:** 文章为原创作品, 无抄袭剽窃, 无泄密及署名和专利争议, 内容及数据真实, 文责自负。

## 4 参考文献 References

- [1] 陆春. 儿童肱骨髁上骨折的内固定治疗[J]. 中国矫形外科杂志, 2007,15(20):1550-1552.
- [2] Mulpuri K, Wilkins K. The treatment of displaced supracondylar humerus fractures: evidence-based guideline. J Pediatr Orthop. 2012;32Suppl 2:S143-152.
- [3] 廖世杰, 赵劲民, 丁晓飞. 儿童肱骨髁上骨折的分型与治疗进展[J]. 中国矫形外科杂志, 2012,20(8):714-716.
- [4] Omid R, Choi PD, Skaggs DL. Supracondylar humeral fractures in children. J Bone Joint Surg Am. 2008;90(5):1121-1132.
- [5] Young S, Fevang JM, Gullaksen G, et al. Deformity and functional outcome after treatment for supracondylar humerus fractures in children: a 5- to 10-year follow-up of 139 supracondylar humerus fractures treated by plaster cast, skeletal traction or crossed wire fixation. J Child Orthop. 2010;4(5):445-453.
- [6] Ababneh M, Shannak A, Agabi S, et al. The treatment of displaced supracondylar fractures of the humerus in children. A comparison of three methods. Int Orthop. 1998;22(4):263-265.
- [7] Tschopp O, Rombouts JJ. Complications of supracondylar fractures of the humerus in children. Acta Orthop Belg. 1996;62(Suppl1):51-57.
- [8] Farnworth CL, Smith PD, Mubarak SJ. Etiology of supracondylar humerus fracture. J Pediatr Orthop. 1998;18:38-42.

- [9] 王建伟,马勇,诸方受,等.肱骨髁上骨折并发肘内翻的生物力学机制研究概况[J].北京中医药大学学报,1998,39(4):58-60.
- [10] D'Ambrosia RD. Supracondylar fractures of humerus-prevention of cubitusvarus. *J Bone Joint Surg Am.* 1972; 54(1):60-66.
- [11] ArinoVL, Lluch EE, Ramirez AM, et al. Percutaneous fixation of supracondylar fractures of the humerus in children. *J Bone Joint Surg Am.* 1977;59(7):914-916.
- [12] 徐华梓,李也白,池永龙,等.儿童肱骨髁上骨折切开复位术后肘内翻畸形[J].中华小儿外科杂志,1995,16(1):28-29.
- [13] 侯德光.肱骨髁上骨折并发肘内翻的探讨[J].中国中医骨伤科杂志,1989,2:28-29.
- [14] 李海波,田心义.儿童肱骨髁上骨折的治疗及肘内翻机理研究进展[J]. 中医药导报,2006,12(2):78-82.
- [15] Flynn JC, Matthews JG, Benoit RL. Blind pinning of displaced supracondylar fractures of the humerus in children. Sixteen years' experience with long-term follow-up. *J Bone Joint Surg Am.* 1974;56(2):263-272.
- [16] Smith L. Deformity following supracondylar fractures of the humerus. *J Bone Joint Surg Am.* 1965;47(8):1668.
- [17] 霍力为,王广伟,庾伟中,等.黄氏手法配合小夹板治疗儿童 Gartland III型肱骨髁上骨折临床观察[J].新中医,2011, 43(11): 65-66.
- [18] 宋冰,刘建科,张伟.手法整复小夹板治疗儿童伸直型肱骨髁上骨折[J].陕西中医学院学报,2008,31(5):37-38.
- [19] 陈执平,齐振熙,周金水.应用三维有限元分析探讨髓芯减压术后产生的空洞对股骨头应力的影响[J].中华关节外科杂志:电子版,2009,3(5):49-52.
- [20] 魏秋实,何伟.有限元分析在股骨头坏死领域中的应用研究[J].中国矫形外科杂志,2010,18(19):1611-1614.
- [21] Bonnick SL. Noninvasive assessments of bone strength. *Curr Opin Endocrinol Diabetes Obes.* 2007;14(6): 451-457.
- [22] Keaveny TM. Biomechanical computed tomography-noninvasive bone strength analysis using clinical computed tomography scans. *Ann N Y Acad Sci.* 2010;1192: 57-65.
- [23] Rice JC, Cowin SC, Bowman JA. On the dependence of the elasticity and strength of cancellous bone on apparent density. *J Biomech.* 1988;21(2):155-168.
- [24] Morgan EF, Bayraktar HH, Keaveny TM. Trabecular bone modulus-density relationships depend on anatomic site. *J Biomech.* 2003;36(7):897-904.
- [25] Rho JY, Hobatho MC, Ashman RB, et al. Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone. *Med Eng Phys.* 1995;17:347-355.
- [26] Bahk MS, Srikumaran U, Ain MC, et al. Patterns of pediatric supracondylar humerusfractures. *J Pediatr Orthop.* 2008;28(5):493-499.
- [27] Shockey JS, von Fraunhofer JA, Seligson D. A measurement of the coefficient of static friction of human long bones. *Surf Tech.* 1985;25(2):167-173.
- [28] Schuster I, Korner J, Arzdorf M, et al. Mechanical comparison in cadaver specimens of three different 90-degree double-plate osteosyntheses for simulated C2-type distal humerus fractures with varying bone densities. *J Orthop Trauma.* 2008;22(2):113-120.
- [29] Dunham CE, Takaki SE, Johnson JA, et al. Mechanical properties of cancellous bone of the distal humerus. *ClinBiomech (Bristol, Avon).* 2005;20(8):834-838.
- [30] 徐华梓,林焱,陈跃忠,等. Baumann角测量预测肱骨髁上骨折肘内翻的研究[J].温州医学院学报,1999,40(1):6-8.
- [31] Williamson DM, Coates CJ, Miller RK, et al. Normal characteristics of the Baumann (humero capitellar) angle: an aid in assessment of supracondylar fractures. *J Pediatr Orthop.* 1992;12(5):636-639.
- [32] Worlock P. Supracondylar fractures of the humerus. Assessment of cubitusvarus by the Baumann angle. *J Bone Joint Surg Br.* 1986;68(5):755-757.
- [33] 庄志强,林乔龄,洪嘉志,等.基于Baumann角测定在预测儿童肱骨髁上骨折并发肘内翻的发生率的临床意义[J].湖南中医药大学学报,2012,32(2):27-28.
- [34] 刘飞,楼跃,唐凯,等.儿童肱骨远端有限元模型的建立及力学分析[J]. 热带医学杂志,2011,11(5):527-528.
- [35] 王亚斌,周小建,任亚军,等.肱骨远端三维有限元模型的建立及生物力学分析[J].中国组织工程研究与临床康复,2011,15(22): 4002-4005.
- [36] 刘剑,黄潮桐,陈隆福,等.肱骨髁上部位局部三维构建及有限元分析[J].中国骨科临床与基础研究杂志,2012,4(6):427-431.
- [37] Lamdan R, Liebergall M, Gefen A, et al. Pediatric supracondylar humerus fractures: effect of bone-implant interface conditions on fracture stability. *J Child Orthop.* 2013;7(6):565-569.
- [38] Sabalic S, Kodvanj J, Pavic A. Comparative study of three models of extra-articular distal humerus fracture osteosynthesis using the finite element method on an osteoporotic computational model. *Injury.* 2013;44Suppl 3:S56-61.
- [39] Worlock P. Supracondylar fractures of the humerus. Assessment of cubitusvarus by the Baumann angle. *J Bone Joint Surg Br.* 1986;68(5):755-757.
- [40] Silva M, Pandarinath R, Farnig E, et al. Inter- and intra-observer reliability of the Baumann angle of the humerus in children with supracondylar humeral fractures. *Int Orthop.* 2010;34(4):553-557.
- [41] 左大鹏.闭合治疗儿童肱骨髁上骨折[J].贵阳中医学院学报, 2008, 30(4):48-50.
- [42] 郭源,王承武,范源,等.儿童“不可复性”肱骨髁上骨折的治疗[J].中华小儿外科杂志,1998,19(2):5-7.
- [43] 凌长敦, 庞国栋. 儿童肱骨髁上移位骨折致肘内翻畸形的探讨与预防[J].广西中医药, 2007,30(4): 50.
- [44] 刘献祥,林木南,符臣学,等. 肱骨髁上骨折并发肘内翻畸形98例临床分析[J]. 中国骨伤,2001,14(4):8-9.
- [45] 王国平,张玉柱,王人彦,等.屈肘前臂旋前位整复固定治疗肱骨髁上骨折120例[J].骨与关节损伤杂志,2002,17(2):150-151.
- [46] 高光明,杜成高. 肱骨髁上骨折后肘内翻畸形的原因探讨[J]. 中国矫形外科杂志,1997,5(6):51-52.