

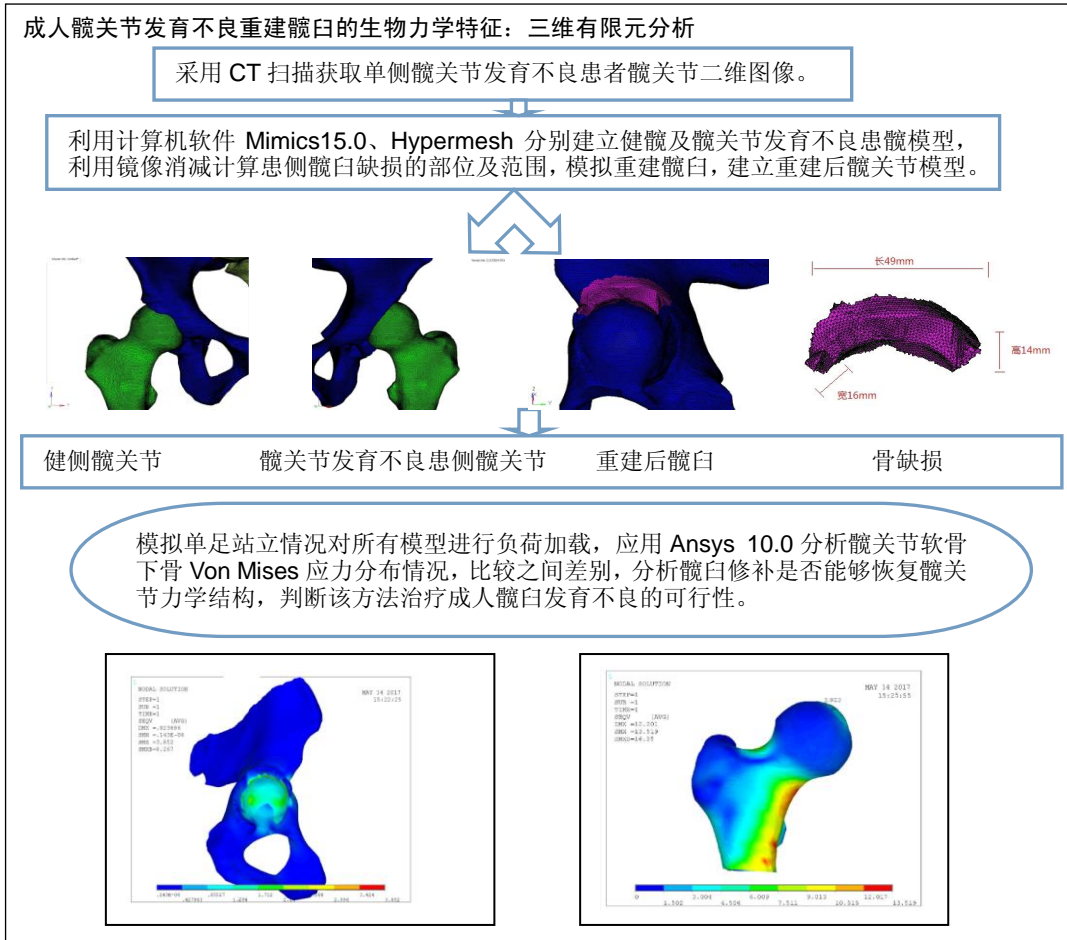
三维有限元法分析成人髋关节发育不良重建髋臼的生物力学特征

田丰德^{1,2}, 赵德伟^{1,2}, 李东怡², 郭林², 安宁², 张耀^{1,2}, 程亮亮², 郝瑞胡², 杨帆¹ (1大连理工大学电子信息与电气工程学部, 辽宁省大连市 116024; 2大连大学附属中山医院关节外科, 辽宁省大连市 116001)

DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.1010

ORCID: 0000-0001-8451-7004(田丰德)

文章快速阅读:



田丰德, 男, 1977 年生, 辽宁省沈阳市人, 汉族, 大连理工大学在读博士, 副主任医师, 主要从事关节外科、生物力学及数字骨科方面的研究。

通讯作者: 赵德伟, 博士, 主任医师, 大连理工大学电子信息与电气工程学部, 辽宁省大连市 116024; 大连大学附属中山医院关节外科, 辽宁省大连市 116001

中图分类号: R445

文献标识码: B

稿件接受: 2018-09-06



Tian Fengde, Doctoral candidate, Associate chief physician, Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China; Department of Joint Surgery, Affiliated Zhongshan Hospital of Dalian University, Dalian 116001, Liaoning Province, China

Corresponding author: Zhao Dewei, MD, Chief physician, Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China; Department of Joint Surgery, Affiliated Zhongshan Hospital of Dalian University, Dalian 116001, Liaoning Province, China

文题释义:

髋关节发育不良: 是骨关节外科常见疾病, 髋臼部位的骨性缺损是成人髋关节发育不良的典型特征之一。该骨性缺损使得髋臼对股骨头包容不足, 二者接触面积减少、局部压强增大, 久之使得髋关节磨损加快, 导致关节炎的发生, 因而髋臼缺损是导致和促进髋关节发育不良病情变化的主要因素。

髋臼重建: 髋臼缺损是导致和促进髋关节发育不良病情变化的主要因素, 将缺损的髋臼重建至正常是髋关节发育不良治疗最理想的方法。自从髋关节发育不良被发现, 如何重建髋臼便一直是专家学者们研究的热点, 目前重建髋臼方法较多, 主要集中于各种关节周围截骨术, 通过手术增加髋臼对股骨头的包容, 部分患者取得了较满意的临床效果。但由于技术问题(缺损的精确测量、定位及截骨移位深度、旋转角度等), 修复后的髋臼仍无法完全与股骨头匹配, 使得该方法的临床疗效仍不完美, 需要改进提高。

摘要

背景: 成人髋关节发育不良目前主要的治疗方法有髋关节周围截骨术、髋臼旋转截骨术、髋臼加盖术等, 方法多样, 疗效不一。由于技术条件的限制, 各种方法虽然不同程度的改善了头臼关系, 但距离理想状态仍有一定差距, 部分患者因而效果不佳, 病情继续发展。

目的: 应用三维有限元方法从力学角度分析成人髋关节发育不良髋臼重建的可行性及有效性, 为以后的科研及临床研究提供理论依据。

方法: 选择单侧髋关节发育不良患者髋关节 CT 薄层扫描数据, 利用 Mimics 15.0、Hypermesh 软件分别建立健髋及髋关节发育不良患髋模型, 利用镜像消减计算患侧髋臼缺损的部位及范围, 模拟重建髋臼, 建立重建髋关节模型, 应用 Ansys 10.0 加载关节负荷, 分析单足着地情况下各髋关节软骨下骨 Von Mises 应力分布情况。

结果与结论: ①各模型结果与实际情况相符合,最大 Von Mises 应力值出现在髋臼顶穹部及股骨颈后内侧;②患髋骨性缺损出现在髋臼前外侧,大小为 43 mm×14 mm×7 mm;③应力加载后各组 Von Mises 应力峰值分别为:健康股骨头(2.800±0.012)MPa,髋臼(3.855±0.035)MPa;髋关节发育不良患髋股骨头(5.066±0.026)MPa,髋臼(8.168±0.034)MPa;重建髋股骨头(2.769±0.085)MPa,髋臼(3.804±0.132)MPa,统计学分析结果显示髋关节发育不良患髋各部位 Von Mises 应力峰值明显高于另外二者($P < 0.001$),差异有显著性意义;而重建髋与健康髋各部位数值相近($P > 0.05$),证明髋臼重建后髋关节应力分布恢复正常;④通过有限元模型受力分析证明,髋臼重建能够恢复髋关节力学结构,该方法治疗早期成人髋关节发育不良是可行性的。

关键词:

成人;髋关节发育不良;髋臼;缺损;关节;应力;三维;有限元;骨科植入物;国家自然科学基金

主题词:

髋脱位,先天性;髋臼;应力,物理;有限元分析;组织工程

基金资助:

国家自然科学基金资助项目(30670542)

缩略语:

髋关节发育不良: developmental dysplasia of the hip, DDH

Biomechanical properties of acetabular reconstruction in adult developmental dysplasia of the hip by a three-dimensional finite element analysis

Tian Fengde^{1,2}, Zhao Dewei^{1,2}, Li Dongyi², Guo Lin², An Ning², Zhang Yao^{1,2}, Cheng Liangliang², Hao Ruihu², Yang Fan¹ (¹Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China; ²Department of Joint Surgery, Affiliated Zhongshan Hospital of Dalian University, Dalian 116001, Liaoning Province, China)

Abstract

BACKGROUND: Many methods are used to treat adult developmental dysplasia of the hip, such as pericapsular osteotomy and rotational acetabular osteotomy. Due to the limitation of technical conditions, the curative effect is different. Although these methods have improved the relationship between the head and the acetabulum in varying degrees, there is still a certain gap from the ideal state, and some patients have poor results with continuous disease development.

OBJECTIVE: To analyze the feasibility and effectiveness of acetabular reconstruction in adult hip dysplasia by three-dimensional finite element method and provide theoretical basis for future clinical research.

METHODS: Thin-slice CT data of unilateral hip dysplasia patient were collected. Mimics 15.0 and Hypermesh were used to establish the model of healthy hip and dysplasia hip, and location and scope of bony defect were calculated, then model of reconstruction of the acetabulum was established by simulating tools. The Von Mises stress distribution in the subchondral bone of each hip joint was analyzed under the condition of single foot standing using Ansys 10.0.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) The results of each model were consistent with the actual situation, and the maximum Von Mises stress value appeared in the acetabular dome and the posteromedial femoral neck. (2) The bone defect appeared in the anterolateral part of acetabulum, the size was 43 mm×14 mm×7 mm. (3) The Von Mises stress peak values of each group after stress loading in the healthy hip were femoral head (2.800±0.012) MPa, acetabulum (3.855±0.035) MPa; femoral head of affected hip (5.066±0.026) MPa; acetabulum (8.168±0.034) MPa; reconstructed hip femoral head (2.769±0.085) MPa, acetabulum (3.804±0.132) MPa. Statistical analysis showed that the peak Von Mises stress in each part of the affected hip was significantly higher than that in the other two groups ($P < 0.001$). The values between reconstructed hip and healthy hips were similar ($P > 0.05$), suggesting that the stress distribution of hip joint was normal after acetabular reconstruction. (4) The stress analysis of finite element model indicates that acetabular reconstruction can restore the mechanical structure of hip joint, and this method is feasible to treat adult early developmental dysplasia of the hip.

Subject headings: Hip Dislocation, Congenital; Acetabulum; Stress, Mechanical; Finite Element Analysis; Tissue Engineering

Funding: the National Natural Science Foundation of China, No. 30670542

0 引言 Introduction

成人髋关节发育不良(developmental dysplasia of the hip, DDH)是一种骨科常见疾病^[1],该病发病隐匿,病程可长达数十年,晚期常因关节功能障碍而行全髋关节置换。全髋关节置换手术时多数患者处在青壮年时期,毫无疑问此类患者未来将面临多次翻修手术,这无疑给患者和家庭造成巨大的负担^[2]。为了解决这个难题骨科专家们一直致力于DDH的早期治疗,通过各种方法改善头臼关系,以达到延缓甚至避免全髋关节置换的目的^[3-6]。目前主要的治疗方法有髋关节周围截骨术、髋臼旋转截骨术、髋臼加盖术等,方法多样,疗效不一^[7-11]。由于技术条件的限制,各种方法虽然不同程度的改善了头臼关系,但距离理想状态仍

有一定差距,部分患者因而效果不佳,病情继续发展。近年来随着多学科合作的不断深入,工程技术在医学领域的应用也逐渐增多,解决了许多医学难题^[12-13]。此次研究拟打破以往技术限制,将工科技应用于DDH的研究中,进一步探讨恢复头臼关系的方法。采用三维重建技术精确测量缺损的大小及位置,应用三维有限元方法模拟修复髋臼,并进行力学测试验证其有效性。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 三维有限元分析。

1.2 时间及地点 实验力学分析在大连大学附属中山医院生物力学实验室完成。

1.3 对象 选择1例单侧DDH患者(Crowe I)^[14-15], 女性, 年龄25岁, 身高155 cm, 体质量47 kg, 经过影像学检查及临床检查, 左侧DDH, 中心边缘角10°; 右侧髋正常。患者对试验知情同意, 试验方案经医院医学伦理委员会审批通过(批准号: 2017-026)。

1.4 方法

1.4.1 有限元模型的建立 将DDH患者髋关节CT薄层(层距1 mm)扫描数据(DICOM格式)导入图像分析软件Mimics 10.0, 精确分割骨盆及股骨上段骨性结构轮廓线, 线条以IGS格式输出至HyperMesh 11.0(美国Altair公司)软件中建立髋关节三维有限元线网格及四面体模型。利用软件自带镜像消减功能比较患侧与健侧髋关节的差异, 计算患侧髋臼缺损的部位及大小。根据骨缺损数据建立补块模型。髋臼重建: 将补块与患髋结合建立重建髋关节模型。

1.4.2 设置边界条件及负载 模型模拟单足站立姿势进行力学分析^[2-3]。力的载荷采用简化髋关节受力模型, 即将髋关节负载(体质量及软组织载荷)以合力的方式施加于股骨头与髋臼的接触区域, 力的大小相当于2.75倍个体质量, 力的方向与中轴呈16°角并通过股骨头中心^[4-5], 股骨远端固定。

1.4.3 应力计算分析 将各组模型导入软件ANSYS 10.0, 设置材料属性(皮质骨E=2 GPa, 泊松比v=0.3; 松质骨E=200 MPa, 泊松比v=0.3)。导入设定的边界及负载条件, 对不同三维有限元模型进行力学分析, 计算各组模型应力分布情况及各兴趣点的应力值, 结果以图示及数值的形式表达。

1.5 主要观察指标 ①各髋关节模型应力分布情况; ②各模型在固定载荷下, 不同兴趣区具体的平均应力值, 实验数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示。

1.6 统计学分析 应用SPSS 17.0(美国SPSS公司)进行统计分析, 采用配对t 检验方法对各组数据进行比较, $P < 0.05$ 为差异有显著性意义。

2 结果 Results

2.1 髋关节三维有限元模型 应用Hypermesh软件分别建立三组髋关节及缺损补块的有限元模型。健康侧髋关节有限元模型有节点268 320个, 四面体单元1 296 041个; DDH髋关节模型有节点266 413个, 四面体单元1 291 289个。

利用镜像消减功能比较患侧与健侧髋关节的差异, 计算患侧髋臼缺损, 结果表明该缺损主要位于髋臼外侧上缘部位, 测量缺损骨块大小为43 mm×14 mm×7 mm, 建立补块模型。模拟髋臼重建手术, 将补块与患髋结合建立重建髋关节模型, 见图1。

2.2 髋臼及股骨的应力分布

2.2.1 各组模型髋臼及股骨的 Von Mises 应力云图 见图2。

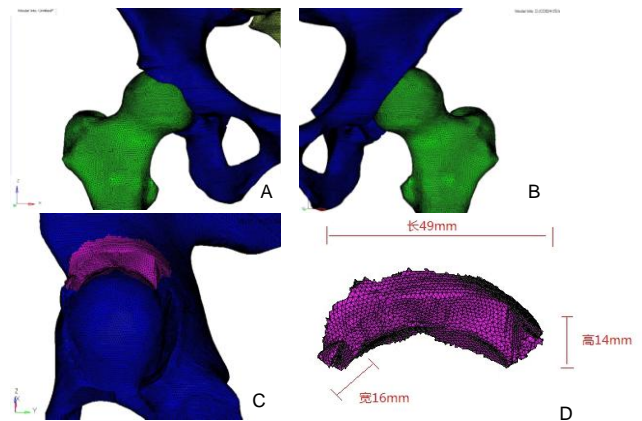


图1 各组三维有限元模型

Figure 1 Three-dimensional finite model in each group

图注: 图A 为健侧髋关节; B 为髋关节发育不良患侧髋关节; C 为重建髋关节; D 为骨缺损补块。

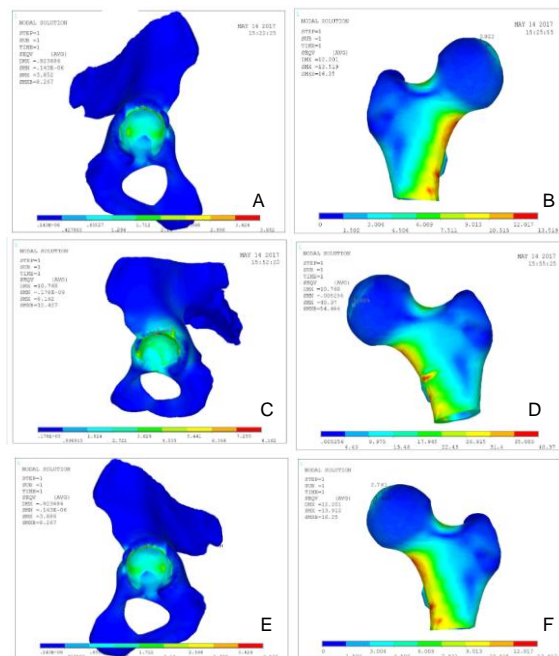


图2 三组模型髋臼及股骨应力分布云图

Figure 2 Stress distribution nephogram of acetabulum and femur of each three-dimensional model

图注: 图A, B 为正常侧; C, D 为患侧; E, F 为重建后。

应力云图结果表明各组髋关节模型应力均由髋臼向股骨头传导, 经股骨颈到近段股骨内上侧, 这与正常髋关节应力传导方式相同。为了便于观察应力在髋臼与股骨的分布情况, 此次研究将髋臼与股骨分离, 单独显示。

结果表明髋臼内应力主要集中于髋臼负重区(髋臼前外上部位), 最大应力位于髋臼外缘。图2A显示正常侧髋臼内应力呈均匀分布; 图2C示患侧髋臼内应力值相对增高(颜色处于下方色谱的位置越偏右则表示应力越大), 而且分布不均匀, 髋臼外侧存在应力集中现象(图2中髋臼外缘红色部分); 图2E见重建髋臼内应力分布恢复均匀, 与正常侧结果相近。

3组模型股骨应力分布情况基本相同, 最大应力均位于

股骨颈后下方及股骨距处，而股骨头处相对处于低应力表达区，仅在关节负重面位置出现稍高应力表达。

2.2.2 各模型髋臼、股骨头及股骨近段Von Mises应力值
测量各模型髋臼、股骨头及股骨近段感兴趣区Von Mises应力值，将各组模型设定在同一负荷，对每个感兴趣区(包括髋臼、股骨头及股骨近段)随机选取20个兴趣点，记录应力值，计算应力平均值及标准差，实验数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示，具体结果见表1。

表1 各模型髋臼、股骨头软骨下骨及股骨近段 Von Mises 应力值比较 ($\bar{x}\pm s$, MPa)

Table 1 Comparison of Von Mises stress value of acetabulum, subchondral bone of the femoral head and proximal femur among models

项目	髋臼	股骨头	股骨近段
健髋	3.855±0.035 ^a	2.800±0.012 ^a	13.518±0.052 ^a
患髋	8.168±0.034	5.066±0.026	40.376±0.190
重建髋	3.804±0.132 ^a	2.760±0.085 ^a	13.922±0.093 ^a
P 值	< 0.001	< 0.001	< 0.001

表注：与患髋比较，^aP < 0.05。

表1数据结果显示DDH、健康对照及重建髋各部位(髋臼、股骨头及股骨近段)Von Mises应力值，结果表明患髋各部位应力值均高于健髋及重建髋(P < 0.001)，证明DDH髋关节各部位在站立时承受更大的压力，DDH的髋臼及股骨头部位所受应力可达健康髋的2倍(髋臼8.168 : 3.855；股骨头5.066 : 2.8)，而股骨近段压力则高达3倍(40.376 : 13.518)，该结果证明了DDH髋关节异常应力的存在，为DDH的异常应力理论提供了直接证据。

统计结果显示，DDH各部位Von Mises应力值明显高于另外二者(P < 0.001)，差异有显著性意义；而重建髋与健髋各部位数值相近，差异无显著性意义(P > 0.05)，证明重建后髋关节应力分布恢复正常，因而髋臼重建治疗DDH的方法从力学角度看是有效的。

3 讨论 Discussion

DDH是一种常见髋关节疾病，根据流行病学调查，该病在国内发病率为1.52%，全国患者数量逾百万^[16]。髋关节解剖结构异常是DDH的主要特征，典型的改变是髋臼顶部发育不良，存在骨性缺损，导致其对股骨头前外侧覆盖不足，髋内收时，股骨头上方覆盖不足。鉴于此，修复髋臼，改善头臼间解剖关系一直是“保髋”治疗的要点^[17-21]。要想恢复解剖结构，首先需要分辨DDH与正常髋的差异之处，早期时候医师依赖二维的X射线片判断，受到投照角度、放大率等影响，结果误差较大；随着CT、MRI的发明应用，使得医生能够在各个断面上测量数据，还可以通过三维重建骨盆从各个角度进行观察比较，这无疑给手术方法的选择提供了有力的依据^[22-24]。该方法相对于X射线方法

更为精确，是目前临床采用最多的方法，但该方法仅能测量线性数据(长度、角度等)，缺少评估结构的体积参数，仍有改进空间。科学家与骨科医师不断寻找一种能够精确计算DDH骨缺损范围及大小的方法，并做了大量研究。数字化技术被应用于各个行业。将人体组织结构数字化，数据储存于计算机，可以随时调用进行相关研究，通过该方法可以更细致、多方位观察组织结构^[25]。李安安等^[26]通过计算机技术对“虚拟中国人男性一号”高精度骨骼系统进行了三维建模工作；肖进等^[27]应用Mimics软件重建脊柱三维骨骼数据；李伟等^[28]建立正常及骨质疏松脊柱三维有限元数字模型，均取得了非常精细的结构数据。在上述成果的基础上，此次研究采用三维建模方式，应用HyperMesh 11.0(美国Altair公司)建立DDH三维有限元模型，利用镜像消减功能将DDH髋与健髋对比分析，从而精确计算了DDH髋臼缺损的部位及范围，以三维立体结构形式单独显示，同时能够精确读取其三维空间数据。所以此方法能够精确对比DDH与正常髋关节解剖差异，为髋关节发育不良的精准修复提供准确数据支持。另外二者对比过程是由计算机计算而得，减少了人为误差，结果更接近现实。所以通过此方法建立的补块能够将DDH髋臼个体化修复，从而避免了尺寸过大过小情况的发生。

修复后髋关节的力学性状是否恢复是专家们关注的另一个问题，为解决该类问题需要将修复的髋关节进行力学测试。传统的力学测试多在尸体标本上进行，选取骨盆标本模拟手术后，将标本固定在力学测试机上，兴趣区放置负荷传感器，通过采集传感器数据计算目标区域的直接负荷，该方法简单方便，但因受机器及传感器精度、标本关节周围软组织(肌肉、关节囊等)无功能、人为误差等原因影响，其采集结果与真实情况差别较大，准确性差。而且由于是尸体标本较活体标本力学性能降低，导致其重复测试数值结果差别较大，使得该结果的可信度降低。另外受传统测试需要标本离体的限制，使得该方法无法应用于活体的临床力学研究中。鉴于此，科学家们一直研究一种能够替代传统方法，简单有效的力学测试方法。随着多学科合作的不断深入，新技术及方法不断应用^[29-30]，使得该研究得以实现。1972年Brekelmans等^[31]首次将有限元法应用于骨科的生物力学研究中，相比于传统力学测试有限元法具有标本无损伤(不需要离体)，便于操作，避免仪器及人工误差；能定量获得模型内部的应力变化，数据准确显示并记录等特点；而且经过近50年的不断发展，人体各部位力学参数被不断补充，使得有限元结果与真实情况相符合，不再被认为是理论性分析，因而被广泛应用于各个领域。崔旭等^[32]采用有限元方法分析囊变对股骨头的影响，预测股骨头塌陷风险。田丰德等^[12]前期研究采用有限元法分析髋臼缺损程度对DDH髋关节应力影响，发现髋臼应力与髋臼缺损呈正相关。此次试验采用有限元法对DDH进行力学

测试,同时验证髋臼重建方法的有效性。模型完全根据患者本人的解剖结构建立,因而所得结果专属于患者本人,符合精准化个体化原则。有限元结果显示DDH髋关节周围应力存在异常,髋臼股骨头及股骨近段均存在应力分布不均现象。髋臼负重部位(外上壁)整体显现高应力分布,平均应力值较正常,升高两至三倍,见表1;边缘局部出现应力集中现象,集中点应力峰值高达10数倍,如此高的应力作用下,该部位软骨及软骨下骨组织受损程度及速度均大于周围组织,进而退变磨损加快。这一结果表明DDH髋关节除解剖结构异常外,还存在髋关节应力改变,二者互为因果,相互作用,髋臼骨缺损造成局部应力增加,而增大的应力加速髋臼的磨损造成更大的缺损,该结果与病情发展过程一致,进而证明髋臼的骨性缺损及异常应力是导致DDH病情发展的主要因素。因此DDH的治疗需要从这两方面入手,才能从根本上解决问题。髋臼重建手术不仅能将缺损的髋臼修复至正常状态,而且此次研究结果表明重建后髋关节各部位应力也恢复至正常,由此证明髋臼重建手术能够同时恢复DDH解剖结构及力学性质,有限元结果证实髋臼重建手术是有效的。

当然此次研究对于试验对象的选择进行了特殊要求,为避免其他结构异常对于研究的影响,只选择了以髋臼缺损为主而其他结构正常的Crowe I期DDH患者,因而该试验的结果只适合早期DDH患者(Crowe I期),对于中晚期患者是否合适有待进一步的研究。随着3D打印技术的不断普及,一些特殊形状的内植物被不断的设计并应用于临床,取得了良好的临床效果^[33-43]。将此次研究结果与3D打印技术结合将会为DDH的治疗提供新的选择,三维重建技术能够精确测量缺损的大小及位置,而3D打印技术能够精确的建立补块使得髋臼完美重建变得可能,两者结合不仅解决了以往对DDH骨缺损评估难及重建难的问题,同时精准重建能够减小手术创伤及风险。当然,要想将此次试验结果完美的应用于临床还需要更加深入的研究,例如髋臼补块材质的选择(金属/非金属;可吸收/不可吸收)、材质结构(实体/多孔;孔隙率大/小)、固定方法(内固定/外固定;螺钉/钢板)等。另外,对于双侧DDH患者因双侧髋关节均不正常缺少健康对照,因而如何判断其理想状况将是摆在面前的一个难题,需要大量的实验数据验证。综上所述,DDH是骨关节外科常见疾病,该病病程长,发展缓慢,晚期多因骨性关节炎需行关节置换手术。早期患者大多是年轻人,病情较轻,此时行关节置换手术显然不适合,而且此类患者主要表现为髋臼骨性缺损,因而如何重建髋臼改善头臼关系一直是国内外骨科专家临床研究的热点,由于技术限制,近年来相关科研进展较小,成果较少。此次研究采用医工结合,将工程学方法应用于医学临床研究中,利用有限元方法精确测量缺损部位及大小,从力学角度证

明DDH重建的可行性及有效性。该方法打破了原有医学研究的固定模式,多学科合作,为DDH的研究提供了新思路及新方法。

结论:有限元模型受力分析证明,髋臼重建能够恢复髋关节力学结构,该方法治疗早期成人髋关节发育不良是可行性的。

作者贡献:田丰德、赵德伟、郭林负责试验设计,李东怡、程亮亮、郝瑞胡、杨帆负责试验实施,安宁、张耀负责评估。

经费支持:该文章接受了“国家自然科学基金资助项目(30670542)”的基金资助。所有作者声明,经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突:文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程,不存在利益冲突。

机构伦理问题:该研究方案的实施符合《赫尔辛基宣言》和大连大学附属中山医院对研究的相关伦理要求。

知情同意问题:参与试验的患病个体及其家属为自愿参加,均对试验过程完全知情同意,在充分了解试验方案的前提下签署了“知情同意书”。

写作指南:该研究遵守《观察性临床研究报告指南》(STROBE指南)。

文章查重:文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审:文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

生物统计学声明:文章统计学方法已经大连大学附属中山医院生物统计学专家审核。

文章版权:文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明:这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- [1] 石学锋,布金鹏,李金松.成人髋臼发育不良生物力学改变及治疗现状[J].中国矫形外科杂志,2003,11(17):1202-1203.
- [2] Banaszekiewicz PA. Total hip replacement in congenital dislocation and dysplasia of the hip. *Classic Papers in Orthopaedics*. Springer London, 2014:15-23.
- [3] 郭磊,赵玉岩,范广宇,等.髋臼发育不良的生物力学实验研究[J].中国医科大学学报,2001,30(4):277-278.
- [4] 傅明,张志奇,向珊珊,等.髋臼旋转截骨术及Chiari截骨术对发育性髋关节发育不良生物力学影响的比较研究[J].中国修复重建外科杂志,2013,27(6):641-644.
- [5] 向珊珊,陈艺,傅明,等.髋臼旋转截骨术时髋臼后上方植骨前后髋关节生物力学的改变及其对比[J].中华关节外科杂志(电子版),2012,6(3):68-71.
- [6] Lubovsky O, Peleg E, Joskowicz L, et al. Acetabular orientation variability and symmetry based on CT scans of adults. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2010;5(5):449.
- [7] 邱国良,邱轩,张长青,等.改良Chiari截骨髋臼加盖延伸成形术治疗发育性髋关节脱位远期生物力学分析[J].中国矫形外科杂志,2015,23(3):276-283.

- [8] 陈晓东,林建华.髋臼翻转造盖术治疗成人髋臼发育不良的生物力学研究[J].中国骨与关节损伤杂志,2006,21(3):176-178.
- [9] 牟世祥,王春祯,王禹增,等.带缝匠肌蒂髂骨移植髋臼成形术治疗发育性髋关节发育不良[J].中国骨与关节损伤杂志,2006,21(1):49-50.
- [10] 王琦,张先龙,蒋垚,等.髋关节表面置换术治疗Crowe I、II型髋关节发育不良[J].中华解剖与临床杂志,2014,19(1):19-23.
- [11] 赵振刚,刘建国,齐欣.成人髋臼发育不良的治疗研究进展[J].中国骨与关节损伤杂志,2007,22(1):83-85.
- [12] 田丰德,赵德伟,李东怡,等.髋臼缺损程度对成人髋关节应力影响的三维有限元分析[J].中国组织工程研究,2018,22(3):380-384.
- [13] 许杰,马若凡,李登,等.髋臼发育不良髋关节置换前髋臼侧的三维测量[J].中国组织工程研究,2013,17(43):7507-7513.
- [14] Clavé A, Tristan L, Desseaux A, et al. Influence of experience on intra- and inter-observer reproducibility of the Crowe, Hartofilakidis and modified Cochin classifications. *Orthop Traumatol Surg Res* Otsr. 2016;102(2):155-159.
- [15] 肖瑜,张福江,马信龙,等.成人髋关节发育不良不同Crowe分型的三维CT影像学特征[J].中华骨科杂志,2014,34(3):311-316.
- [16] Tian FD, Zhao DW, Wang W, et al. Prevalence of developmental dysplasia of the hip in chinese adults: a cross-sectional survey. *Chin Med J*. 2017;130(11):1261-1268.
- [17] 冉学军,蒲川成,胡兆洋,等.Crowe III、IV型成人髋臼发育不良THA术中髋臼重建体会[J].中国骨与关节损伤杂志,2018,23(2):159-160.
- [18] 周金,刘炯,杨砥,等.3D打印技术辅助成人DDH初次THA的髋臼置入[J].中国矫形外科杂志,2017,25(23):2182-2186.
- [19] 朱贤平,滕晓,泮宸帅,等.旋转中心内移结合上移重建髋臼技术治疗Crowe II、III型成人发育性髋关节发育不良的疗效分析[J].中华危重症医学杂志(电子版),2017,10(1):34-39.
- [20] 周杰,熊小明,刘昕,等.DDH股骨近端截骨儿童髋部锁定板与普通锁定板固定的比较[J].中国矫形外科杂志,2017,25(23):2128-2133.
- [21] 李文广,向浩,邹刚,等.伯尔尼髋臼周围截骨术治疗髋关节发育不良的近期疗效[J].临床骨科杂志,2017,20(4):432-436.
- [22] 何金鹏,郝运,郑强,等.CT三维重建评价发育性髋关节发育不良髋关节骨化发育研究[J].中华实验外科杂志,2017,34(2):325-328.
- [23] 路玉峰,许鹏,郭万首,等.成人正常髋关节旋转中心的X线影像测量研究[J].中华解剖与临床杂志,2017,22(2):99-102.
- [24] 颜俏燕,丁士申,刘铁军.X线正位片及多层螺旋CT三维成像检查在成人发育性髋关节发育不良中的诊断价值[J].广西医学,2018,40(4):451-453.
- [25] 杨溢,刘坚林,唐雷,等.采用数字人模型探究DDH闭合复位后股骨头缺血坏死的发生机制[J].中国矫形外科杂志,2017,25(19):1805-1810.
- [26] 李安安,刘谦,龚辉,等.“虚拟中国人男性一号”高精度骨骼系统的三维建模[J].中国临床解剖学杂志,2006,24(3):292-294.
- [27] 肖进,尹庆水,张美超,等.Mimics软件重建脊柱三维骨骼数据基础上快速成型的脊柱畸形模型[J].中国组织工程研究,2008,12(35):6835-6838.
- [28] 李伟,张宏,曹丽君,等.脊柱腰段正常及骨质疏松三维有限元数字模型的建立[J].中国组织工程研究,2013,17(9):1521-1526.
- [29] 王百盛,张敬东,韩文锋,等.3-D打印技术辅助人工全髋关节置换术治疗Crowe IV型髋关节发育不良合并股骨近段畸形一例[J].中国修复重建外科杂志,2018,32(1):125-127.
- [30] 涂强,曹露,丁焕文,等.3D打印个性化手术导航模板在成人发育性髋脱位髋臼重建中的应用[J].临床外科杂志,2017,25(4):295-299.
- [31] Brekermans WAM, Rybicki EF, Burdeaux BD. A new method analysys mechanical behavior of skeletal parts. *Acta Orthop Scand*. 1972;43:301-305.
- [32] 崔旭,赵德伟,古长江.股骨头缺血性坏死塌陷预测的生物力学研究[J].中国临床解剖学杂志,2005,23(2):82-87.
- [33] 吴天顺,陈扬,蓝涛,等.脊柱3D打印椎间融合器材料的初步展望[J].生物骨科材料与临床研究,2018,15(1):58-63.
- [34] 刘忠军.金属3D打印骨科内植物的应用现状与发展趋势浅析[J].骨科临床与研究杂志,2017,2(2):65-67.
- [35] 王燎,戴冠戎.骨科个体化治疗与3D打印技术[J].医用生物力学,2014,29(3):193-199.
- [36] 蒋明辉,蔡立宏,雷青,等.3D打印技术在骨科临床的应用研究及展望[J].中华损伤与修复杂志:电子版,2016,11(4):288-290.
- [37] 宋哲,衡立松,王晨,等.3d打印模型在创伤骨科患者中的应用价值.美国际创伤杂志,2017,16(3):4-7.
- [38] 范立军,李伟,范显超,等.3d打印实体模型在创伤骨科困难手术中的应用.中国伤残医学,2017,25(12):66-68.
- [39] 胡堃,李路海,余均武,等.3d打印技术在骨科个性化治疗中的应用.高分子通报,2015,28(9):61-70.
- [40] 熊敏剑,唐理英,莫世奋,等.3d打印骨折模型在股骨转子间骨折治疗中的应用价值.中国医药科学,2018,8(12):10-13.
- [41] 黄昆,唐箫,张淼.Mimics结合3d打印技术在骨科手术前演练体会[J].中国伤残医学,2018,26(10):58-59.
- [42] 时景伟,郑长军,李晓燕,等.3d打印技术在股骨头坏死治疗中的应用[J].中华实验外科杂志,2017,34(6):1076-1078.
- [43] 杨宇,刘大鹏,程奎,等.应用3d打印截骨导航模板进行胫骨截骨矫形的实验研究[J].中国数字医学,2017,12(1):58-60.