

肩关节复合体模型构建及该领域有限元研究与进展

曾昱源¹, 杨振², 由一航¹, 张恩水³, 张涛³

<https://doi.org/10.12307/2024.038>

投稿日期: 2023-03-01

采用日期: 2023-04-14

修回日期: 2023-04-24

在线日期: 2023-05-13

中图分类号:

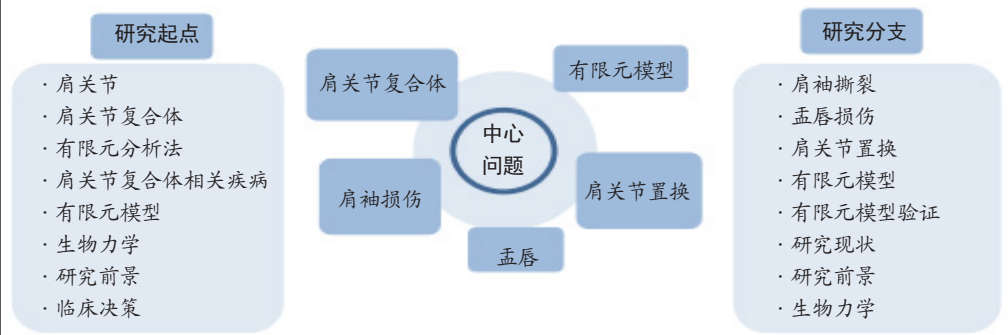
R496; R318; R687.3

文章编号:

2095-4344(2024)18-02906-06

文献标识码: A

文章快速阅读: 肩关节领域的有限元研究现状



文题释义:

肩关节复合体: 包括盂肱关节、肩锁关节、胸锁关节及肩胛胸壁关节。肩关节的活动并不单独由盂肱关节运动完成, 而是多关节参与的复合运动。

有限元分析法: 是一种通过数值模拟近似的方法, 借助电子计算机对真实物体进行模拟运算, 从而实现用有限个单元去无限逼近未知量的一种运算方法, 既往多运用于桥梁设计、车辆评估等诸多工程学领域。随着人体生物力学领域的不断发展, 有限元分析法逐渐被应用于生物力学领域, 对诸如骨折的发生机制、临床手术方案决策等方面发挥着重要的作用。

摘要

背景: 肩关节作为人体上肢的一个非负重关节, 被认为是灵活性与稳定性的完美折中。肩关节传统实验力学研究受限于体内结构的复杂性及测量技术、伦理问题等, 存在一定的局限性。将有限元分析方法应用于肩关节领域研究, 对肩关节疾病探讨、手术方式决策等方面提供了有价值的参考结论。

目的: 综述肩关节领域的有限元研究现状, 对后续研究前景提出展望。

方法: 使用计算机在PubMed、Web of Science及中国知网、万方数据库已发表的文献中, 检索使用有限元分析方法研究肩关节复合体相关疾患的相关文献。中文检索词: “肩关节、有限元分析、肩袖损伤、盂唇、肩关节置换”, 英文检索词: “FE、should joint、glenohumeral joint、rotator cuff tears、glenoid labrum、shoulder arthroplasty”。检索时限重点在2010年1月至2023年1月, 对部分重要文献另加以追踪并检索、阅读。

结果与结论: ①随着模型数据的网络公开化及相关模型数据库的建立, 现如今的有限元研究越来越具备规范化、数据可复制性。②经广泛验证的肩关节有限元模型, 深化了对肩关节领域的理解, 从而实现更高效的临床决策。③随着计算机技术及软件开发等方面的不断发展, 未来的有限元研究必然成为临床科研工作不可或缺的实用工具。

关键词: 肩关节; 肩袖撕裂; 盂唇; 关节置换; 有限元分析; 生物力学; 研究进展

Construction of shoulder joint complex model and finite element research and progress in this field

Zeng Yuyuan¹, Yang Zhen², You Yihang¹, Zhang Enshui³, Zhang Tao³

¹Shandong First Medical University (Shandong Academy of Medical Sciences), Jinan 250000, Shandong Province, China; ²Weifang Medical University, Weifang 261000, Shandong Province, China; ³Jinan Central Hospital, Jinan 250014, Shandong Province, China

Zeng Yuyuan, Master candidate, Shandong First Medical University (Shandong Academy of Medical Sciences), Jinan 250000, Shandong Province, China

Corresponding author: Zhang Tao, MD, Associate chief physician, Master's supervisor, Jinan Central Hospital, Jinan 250014, Shandong Province, China

Co-corresponding author: Zhang Enshui, MD, Attending physician, Jinan Central Hospital, Jinan 250014, Shandong Province, China

Abstract

BACKGROUND: The shoulder joint, as a non-weight-bearing joint of the human upper limb, is considered a perfect compromise between flexibility and stability. The traditional experimental mechanics research of shoulder joints has some limitations due to the complexity of internal structure, measurement techniques and ethical issues. The finite element analysis method is applied to the research of shoulder joints, which provides valuable reference conclusions for the discussion of shoulder joint diseases and the decision of surgical methods.

¹山东第一医科大学(山东省医学科学院), 山东省济南市 250000; ²潍坊医学院, 山东省潍坊市 261000; ³济南市中心医院, 山东省济南市 250014

第一作者: 曾昱源, 男, 1994年生, 江西省吉安市人, 汉族, 山东第一医科大学(山东省医学科学院)在读硕士, 主要从事运动医学专业研究。

通讯作者: 张涛, 博士, 副主任医师, 硕士研究生导师, 济南市中心医院, 山东省济南市 250014

共同通讯作者: 张恩水, 博士, 主治医师, 济南市中心医院, 山东省济南市 250014

<https://orcid.org/0009-0005-2608-9757> (曾昱源); <https://orcid.org/0000-0001-5338-3314> (张涛); <https://orcid.org/0009-0002-0081-8817> (张恩水)

基金资助: 济南市科学技术局临床医学科技创新计划(202019037), 项目负责人: 张恩水; 济南市科学技术局科技发展计划项目

(20120206), 项目负责人: 张涛

引用本文: 曾昱源, 杨振, 由一航, 张恩水, 张涛. 肩关节复合体模型构建及该领域有限元研究与进展 [J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(18):2906-2911.



OBJECTIVE: To review the status of finite element research in the field of the shoulder joint, and to put forward the prospect of future research.

METHODS: The finite element analysis method was used to search the literature on shoulder joint complex-related diseases in PubMed, Web of Science, WanFang and CNKI databases by computer. Chinese search terms were “shoulder joint, finite element analysis, rotator cuff injury, glenoid labrum, shoulder joint replacement”. English search terms were “FE, should joint, glenohumeral joint, rotator cuff tears, glenoid labrum, shoulder arthroplasty”. The search period was mainly from January 2010 to January 2023. Some important documents were also tracked, retrieved and read.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) With the open network of model data and the establishment of relevant model databases, finite element research has become more and more standardized and reproducible. (2) The widely validated finite element model of the shoulder joint deepens our understanding of the shoulder field to enable more efficient clinical decision-making. (3) With the continuous development of computer technology and software development, future finite element research is bound to become an indispensable practical tool for clinical scientific research.

Key words: shoulder joint; rotator cuff tear; glenoid labrum; arthroplasty; finite element analysis; biomechanics; research progress

Funding: Clinical Medicine Science and Technology Innovation Program of Jinan Science and Technology Bureau, No. 202019037 (to ZES); Science and Technology Development Program of Jinan Science and Technology Bureau, No. 20120206 (to ZT)

How to cite this article: ZENG YY, YANG Z, YOU YH, ZHANG ES, ZHANG T. Construction of shoulder joint complex model and finite element research and progress in this field. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2024;28(18):2906-2911.

0 引言 Introduction

肩关节作为人体上肢的一个非负重关节，也是最为独特的关节，对比其他关节具有更小的关节面包裹度，这种结构既实现更大的活动范围，然而又导致了稳定性欠佳的缺陷，被认为是灵活性与稳定性的完美折中^[1]。既往对肩关节的生物力学研究受限于体内结构的复杂性及测量技术、伦理问题等，往往难以得出对临床有较大指导意义的结论^[2-3]。随着计算机技术的发展，尤其是有限元方法的应用，使得既往难以在体内测量的应力、应变分布变成了可能。将有限元分析方法应用于骨科生物力学领域，探讨诸如骨折发生机制、内植物材料分析、人体工程学评估等领域，具有广阔的指导前景。

肩关节复合体的探讨一直是人体生物力学有限元领域中的一大热点及难点，探讨模型结构经历了从 1D 至 3D，探讨工况也从静力学分析逐渐向动力学分析进步。随着研究的不断深入，对后续研究者的临床知识及工程学知识储备提出了更高的研究门槛。国内外研究者少有对肩关节有限元领域文献进行综述报道，该文通过对近十余年的肩关节复合体有限元分析文献进行归纳总结，将既往文献报道范围大致分类为肩关节复合体的模型验证、肩袖撕裂、孟唇损伤及肩关节置换术四部分，对肩关节领域有限元研究现状进行综述，并对后续研究前景提出展望。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

1.1.1 检索人及检索时间 第一作者在 2023 年 1 月进行文献检索。

1.1.2 检索文献时限 检索时限自 2010 年 1 月至 2023 年 1 月。

1.1.3 检索数据库 PubMed、Web of Science、中国知网和万方数据库。

1.1.4 检索词 中文检索词：“肩关节、有限元分析、肩袖损伤、孟唇、肩关节置换”；英文检索词：“FE、should joint、glenohumeral joint、rotator cuff tears、glenoid labrum、shoulder arthroplasty”。

1.1.5 检索文献类型 期刊文章，专著，论文集，学位论文，电子文献等。

1.1.6 手工检索情况 对所检索文献中参考意义较大的文献，进行文献追踪，并以标题进行检索，根据检索目的酌情阅读摘要或全文阅读，追踪创新性的研究方法及可参考数据。

1.1.7 检索策略 以 PubMed 及中国知网数据库检索策略为例，汇总如图 1。

PubMed、Web of Science 数据库	中国知网、万方数据库
#1 FE [Title/Abstract]	#1 肩关节 [篇名 / 摘要 / 关键词]
#2 shoulder joint[Title/Abstract]	#2 有限元分析 [篇名 / 摘要 / 关键词]
#3 glenohumeral joint[Title/Abstract]	#3 肩袖损伤 [篇名 / 摘要 / 关键词]
#4 rotator cuff tears[Title/Abstract]	#4 孟唇 [篇名 / 摘要 / 关键词]
#5 glenoid labrum[Title/Abstract]	#5 肩关节置换 [篇名 / 摘要 / 关键词]
#6 shoulder arthroplasty[Title/Abstract]	#6 #1 AND #2
#7 (#2 AND #1) AND (#3 OR #4 OR #5 OR #6)	#7 #2 AND #3
#8 (#2 AND #1) AND #3	#8 #2 AND #4
#9 (#2 AND #1) AND #4	#9 #2 AND #5
#10 (#2 AND #1) AND #5	
#11 (#2 AND #1) AND #6	

图 1 | 中英文数据库文献检索策略图

1.1.8 检索文献量 英文数据库检索到 315 篇文献，中文数据库检索到 152 篇文献。

1.2 检索方法

1.2.1 纳入标准 ①论述有限元分析法在肩关节领域发展过程及应用情况的文献；②论述有限元分析方法在肩关节各类疾病中应用的文献。

1.2.2 排除标准 排除各数据库中重复性的文献及与检索内容相差较远的文献。

1.3 数据的提取 共检索到 467 篇文献，包括英文文献 315 篇、中文文献 152 篇，通过阅读文题及摘要进行初步筛选，去除各数据库重复文献及与主题不符的文献，根据纳入标准及排除标准确立 60 篇文献，如图 2 所示。

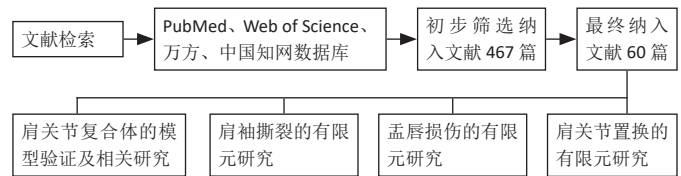


图 2 | 文献筛选流程图

2 结果 Results

2.1 肩关节复合体的模型验证及相关研究 有限元分析方法在骨科的应用方式多样，从预测骨折发生机制，到评估手术效果、指导手术技术革新，应用于骨科临床多领域的探讨。DAHAN 等^[4]通过有限元模型分析结合实验模型，预测了肱骨近端解剖颈骨折的发生机制。MENEGAZ 等^[5]及 GAO 等^[6]则将有限元分析方法运用于对肩锁关节脱位的手术技术探讨，对手术技术的革新提供了一定的技术支持。WANG 等^[7]通过对比肱骨干骨折术后旋转不良的生物力学环境，发现术中复位不佳致肱骨近端内旋畸形，将使得关节盂和肱骨头前下部应力过于集中，会导致肩关节退行性性疾病的发生；复位不佳所致的外旋畸形则会导致肩部相对较低的应力分布，可能会增加肩关节脱位的风险，为骨折的术后康复情况做出了合理预测。ELWALL 等^[8]则开发并验证了全肩及反肩置换术后的肩关节肌骨模型，为关节假体的设计优化提供了可行性选择。以上这些有限元技术应用，都表明有限元技术可以从疾病发生机制、治疗方案决策、术后康复预期及内植物设计优化等各个方面为临床决策服务。

BOLA 等^[9]通过对比肩关节有限元建模与实验模型之间的各种工况下的应力、应变情况，并借助统计学方法验证了各数据并不存在明显统计学差异，证实了有限元模型对复杂生物力学研究的可行性及必要性。此外，在其实验过程中，提出有限元建模是否可靠，需解决如下难点：肌肉、骨骼的实际结构，肌肉的起止位置及材料特性。除上述几点外，周建华等^[10]在其研究中也指出：边界条件设定、单元数目的划分均会对结果的精准造成一定影响。肌肉、骨骼的实际结构的保证，可以通过高精度 CT 及 MRI 获得，并在建模过程中通过医疗专业人士对各组织结构的精确辨认得以实现；但对肌肉的起止位置的把控，往往会出现些许误差。HOFFMAN 等^[11]通过计算肩袖、三角肌的生理作用线以评估力矩臂与肌腱起止点之间的相关性，其实验过程模拟了外展、内收及旋转的动态运动范围，并与 HIK 等^[12]的数据进行对比，发现肌肉插入点的错误

会导致动作线预测结果的背道而驰。对于材料特性的把控，既往多通过取骨标本的方法作为计算密度-模量关系的“金标准”，而 KNOWLES 等^[13]通过微有限元模型 (μ -fem) 技术及联合注册的定量计算机断层扫描有限元模型 (QCT-FEMs)，对肩胛骨小梁进行密度-模量关系的运算，发现运算结果与传统力学测试结果相近，微有限元模型 (μ -fem) 技术能准确确定骨小梁的生物力学性能。既拓宽了有限元技术的应用领域，又与传统力学测试对材料特性的研究相辅相成。

早期有限元研究集中于静力学分析，但对于人体复杂运动而言，运动状态分析显得越来越迫切。既往在肩关节领域，为缩小计算量，多将肩部运动时肌肉模型简化为线段的简单收缩，例如 SADEQI 等^[14]所开发的一套开源的肩关节有限元模型，其模型对肩关节各活动角度下盂肱关节的应力与既往数据对比，保证了模型的分析精度，模型发布于 github.com/OSEL-DAM/ShoulderFiniteElementModel 以供后来者使用。然而这种将肩部肌肉运动的简化，必然使得对于肌肉-肌肉间相互作用及复杂的肌肉纤维运动轨迹等情况难以在运算结果中体现。WEBB 等^[15]通过对比基于线段的三角肌模型和 3D 三角肌模式，指出传统的线段模型并不能准确反映肌肉间机械耦合的影响，且难以约束肌肉路径，使得模型运算的力矩臂将随着肩关节旋转而变化，而 3D 模型则能准确预测各肌肉内纤维间的力矩臂的显著变化。这项研究结果也对之后的肌-骨模型的有限元分析提出了更高的要求。鉴于肩关节建模的复杂性，ELWELL 等^[8]开发并验证了一套开源的肩关节全体积肌骨模型，发布于 <https://simtk.org/projects/das>，为后续的肩关节研究提供了可予以借鉴的模型。

肩关节有限元研究目前存在诸多研究难点，作者将既往研究中所指出的难点及目前的解决方案归纳如表 1 所示。今后的人体有限元研究，将更需要多学科、多领域共同合作才能实现对模型运算结果精度的把控，同时，基础领域的不断研究深入，也对既往研究结果的可信度提出了新的挑战。

表 1 | 肩关节复合体建模现阶段研究难点及解决方案

问题提出者	难点概述	解决方案
BOLA 等 ^[9]	肌、骨实际结构模拟	高精度 CT、MRI+ 医疗专业人士辨认
BOLA 等 ^[9] 、HOFFMAN 等 ^[11]	肌腱起止位置掌控	医疗专业人士辨认
BOLA 等 ^[9]	各组织结构材料特性赋予	取骨样本计算密度-模量关系获取；微有限元模型 (μ -fem) 技术及联合注册的定量计算机断层扫描有限元模型 (QCT-FEMs) 运算获取
周建华等 ^[10]	边界条件设定	借助公开模型
周建华等 ^[10]	单元数目划分	借助公开模型
WEBB 等 ^[15]	肩部运动简化，无法体现肌-肌相互作用及肌纤维运动轨迹	运用 3D 全体积肌骨模型进行研究

2.2 肩袖撕裂的有限元研究 肩袖是由冈上肌、冈下肌、小圆肌及肩胛下肌 4 块肌肉组成，并如同袖套状结构包裹、控制盂肱关节活动，门诊主诉为肩痛的患者中，半数以上患有肩袖撕裂^[16]。肩袖撕裂发生机制主要分为内源性理论和外源性理论两大类。简言之，内源性理论认为肩袖撕裂是由于肌腱的退行性改变所致；外源性理论则认为肩袖撕裂的产生，是由于肩袖组织的肩峰下撞击或明确外伤史所产生的^[17]。而近年来对撞击的深入研究又将撞击分为肩峰下撞击、喙突撞击、后上内部撞击及前上内部撞击 4 种情况^[18]。EL-AMIN 等^[19]通过统计学研究，发现喙突形态、肌腱脂肪浸润程度、喙肱间隙、肩肱间隙、喙突过度覆盖等与肩袖撕裂的发生均存在相关性。VIEHOFER 等^[20]通过 3D 有限元模型发现，较大的临界肩角倾向于导致盂肱关节的不稳定，从而使得在外展过程中需要更强的冈上肌拉力维持稳定，并合理推测大临界肩角是诱发冈上肌撕裂的原因。有限元分析方法主要的研究倾向于对外源性机制的加深探讨。

既往的肩关节有限元研究文献，多存在模型过度简化、模型工况单一的情况。INOUE 等^[21]通过 CT 图像，建模了包含有冈上肌、冈下肌及肩胛下肌 3 块主要肩袖组织及肱骨、肩胛骨的多体模型，并模拟了 0°、45° 及 90° 外展角下 3 种工况，其在研究中发现，随着外展角度的增大，冈上肌腱关节侧、滑囊侧应力及两者间的应力差值均在不断增大，由此合理猜测两层间的剪切应力导致冈上肌腱的层裂。李立^[22]在其基础上

改进，通过 MRI、CT 数据分别建模肌腱软组织及骨骼结构，充分保证了建模结构的准确性，并通过空间位置匹配，还原了完整且仿真的肩关节复合体结构，其研究模拟了更多的外展角度，支持了前者的研究结果。

除模型过于简化及工况模拟欠缺外，材料赋值简化、缺少实验验证也是需不断改进的方向。ISLAN MARCOS 等^[23]为了追求在不修改初始网格的情况下，实现同一关节不同位置的有限元分析，将韧带、肌肉等可变形的解剖结构使用 1D 梁单元，而对关节骨骼、肌腱等使用 3D 体单元，建模了一个包含肩袖主要肌肉 (冈上肌、冈下肌、肩胛下肌、小圆肌)、韧带、盂唇、软骨及肩胛骨、肱骨等骨骼结构的完整肩关节模型，分别分析：①重力情况无外力；②重力 +50 N 垂直于盂唇方向压力；③重力 +50 N 沿重力方向下拉 3 种工况下的受力情况，并将所运算结构与实际工况下的人体关节加载状态对比，验证了建模的准确性，从而发现：①对于骨骼而言，最大应力在肌骨交界处；②对于软骨而言，最大应力在盂肱关节软骨的前下部；③对于肌肉肌腱而言，最大应力表现在肌腱区域。MATTHEW MILLER 等^[24]则建模了含有冈上肌腱的 3D 有限元模型，并采集尸体标本上观察区域的特定几何结构及特定位置的材料属性进行应变运算及验证，分析了 60°、70° 及 90° 外展情况，发现冈上肌腱的最大张力在关节侧的肌腱前缘及肌腱中部之间。这两项研究均对之后的有限元建模研究起到了一定的借鉴作用。各研究对肩袖撕裂发生机制的探讨，归纳如表 2。

表 2 | 肩袖撕裂发生机制时间脉络图

发表年份	作者	改进点	结论
2013	INOUE 等 ^[21]	多体模型，三种工况	冈上肌关节侧、滑囊侧剪切力导致冈上肌层裂
2018	李立 ^[22]	MRI、CT 建模	优化模型并再次证实了 Inoue 的观点
2019	ISLAN MARCOS 等 ^[23]	有限元模型 + 实验验证	最大应力集中于冈上肌肌腱区域
2019	MATTHEW MILLER 等 ^[24]	有限元模型 + 实验验证	冈上肌腱的最大应力在关节侧的肌腱前缘及肌腱中部之间

然而，既往的有限元研究多集中于机械应力引发肌腱组织撕裂的假设去探讨肩袖撕裂病因，少了对撕裂发展机制的探讨。为实现对撕裂发展机制探讨，可通过建模过程中刻意构建病理模型而实现。SANO 等^[25]通过构建新月形及 L 型肩袖撕裂模型，模拟了外展、外旋的运动过程，发现新月形撕裂的高应力集中在肌腱前、后缘；L 型撕裂则集中于肌腱后缘及纵向撕裂的底部；对于撕裂尺寸而言，尺寸越大，则撕裂的病程进展越迅速。邢秋娟等^[26]通过 CT 构建包含有冈上肌、肱骨及肩胛骨的简易模型，发现冈上肌腱的应力主要集中于肌腱的中部，其次为前、后部，并同时发现当冈上肌腱中部损伤深度达 40%，前后区损伤深度达 60% 时，周围肌腱应力会过度集中，从而建议此时应尽快行手术治疗。除了模拟病理模型外，亦可通过对肌腱的多次赋值创造差异而进行研究。MILLER 等^[27]通过对冈上肌腱赋予不同退变程度的力学参数，得出退变越严重，撕裂的进展则越迅猛。FERRER 等^[28]则在 1 cm 冈上肌撕裂病理模型上，分别模拟了前后尖端提升 50% 胶原纤维模量、前后尖端降低 50% 胶原纤维模量、内外侧中点附近降低 50% 胶原纤维模量，并加入空白对照，对这 4 种情况模拟从而得出：在撕裂前后尖端的强化对撕裂的进一步扩大具有阻遏作用，为后续的肩袖治疗的研究提供了一定理论指导。对肩袖撕裂病程进展机制的探讨，归纳如表 3。

表 3 | 肩袖撕裂病程进展机制时间脉络图

发表时间	作者	结果
2013	SANO 等 ^[25]	新月形撕裂应力集中于肌腱前后缘；L 型撕裂集中于后缘及纵向撕裂底部，尺寸越大，病程进展越迅猛
2018	邢秋娟等 ^[26]	冈上肌腱中部 40% 损伤深度，前后区 60% 损伤深度，容易导致病程进展迅猛
2020	FERRER 等 ^[28]	撕裂口前后尖端强化遏制病程进展

对于肩袖撕裂治疗方案选择，涉及缝合方式、锚钉固定效能等多方面考量。既往研究普遍认为增大肌骨接触面积，可使得应力分布分散，缝合效果更佳^[29]。除对缝合方式的探讨外，缝线锚钉的置入角度也会对缝合效果产生影响。包呼日查等^[30]通过 3D 有限元模型，模拟了 45°、90° 两种锚钉置入角度，并得出 90° 的置入角度所获得的应力更分散，

更不易出现缝合失败的情况。对于植入物锚钉的拔出机制, CHEVALIER 等^[31]通过 micro CT 分别构建微型有限元 (micro finite element, μ FE) 模型及均质化有限元 (homogenized classical FE models, hFE) 模型并对比进行锚钉拔出实验, 并得出结论: 均质化有限元模型用于评估骨锚定的可行性, 并且认为通过骨水泥等方式加固植入点的周围骨表观密度、多载荷背景下的修补强度、植入物的场景等均会对骨锚定固定强度造成影响。SANO 等^[32]通过对 TwinFix Ti 植入锚钉的 3D 有限元分析, 发现当锚钉的平均拉应力载荷 < 75.4 N 时, 锚钉固定效果尚可, 如若大于这个数值, 将会导致锚钉的固定失效, 为之后的相关锚钉固定效果评估给出了可借鉴的数据。同年, SANO 等^[33]又对 TwinFix Ti, HEALICOIL PK 及 HEALICOIL RG 3 种锚钉进行了肩袖缝合强度测试, 得出如下结论: ① TwinFix Ti 锚钉主要应力集中于骨表面螺纹处, 易导致该处出现固定失败; ② HEALICOIL RG 锚钉具备最佳的初始固定效能。

肩袖撕裂是临床肩痛主诉中最常见的疾病, 由于肩关节复杂的运动方式, 肩袖撕裂模型具备建模简单、组件较少及运算结果易收敛等优势, 早些年文献对肩袖撕裂的研究报道较多, 主要集中于对肩袖撕裂的发生、发展机制的探讨较多, 也有对治疗方案决策优化的探讨。借助有限元分析方法, 使得目前对肩袖撕裂的治疗已趋于规范, 由此可见有限元分析方法在临床工作决策中不可或缺的价值。随着有限元建模及对肩关节生理结构的研究的深入, 越来越多的研究已往盂唇损伤及肩关节置换等方向进展。

2.3 肩关节盂唇损伤的有限元研究 肩关节作为活动度最大的人体关节, 代价是牺牲了一部分关节稳定性, 故肩关节脱位在临床中较为常见。肩关节脱位发生后, 通常伴有软组织损伤, 盂唇作为盂肱关节的主要被动稳定结构之一, 常常在肩关节脱位后发生损伤。KLEMT 等^[34]借助有限元模型, 模拟了在生理关节负荷下盂唇对盂肱关节稳定性贡献的定量分析, 并认为盂唇对肩关节的稳定性占 11.5%–27.1% [男 (19.3 \pm 7.8)%; 女 (18.1 \pm 5.9)%], 且盂唇后下方及下方结构对盂肱关节稳定性尤甚。盂唇在盂肱关节中, 有增加关节窝的深度及凹度, 并抵抗股骨头平移的作用^[35]。近年来, 随着运动医学领域的发展, 越来越多的研究聚焦在盂唇等软组织结构。

既往研究认为, 上盂唇前后向 (superior labrum anterior posterior, SLAP) 损伤机制可能是: ①由于肱骨头受压及肱二头肌腱联合作用; ②肱二头肌腱的牵拉及扭曲所致。HWANG 等^[36]通过构建包含有肱骨、肩胛骨、盂唇、软骨及肱二头肌的有限元盂肱关节模型, 模拟了肱二头肌 4 种张力 (0, 22, 55 及 88 N) 及股骨头缓慢向上 (0–5 mm, 以 1 mm 为分析步) 平移对盂唇应变的影响, 并认为在盂唇 SLAP 损伤中, 肱骨上移相较于肱二头肌张力更占主导地位。随后, HWANG 等^[37]又运用了类似模型, 模拟了不同大小 SLAP 撕裂时肱二头肌肌腱张力对撕裂传播的影响, 并认为当盂唇应变大于 40% 时, 撕裂进展将不可避免, 从而得出当盂唇撕裂口大于肱二头肌肌腱盂唇起始处宽度时, 应积极进行手术治疗的结论。遗憾的是, 其研究并未对手臂位置进行探讨。JANG 等^[38]通过模拟肱骨从 0° 外展位到外展外旋位的运动过程中, 观察肩关节内各结构撞击行为, 其建立了健康对照组及 SLAP 损伤观察组 2 个模型, 发现当存在 SLAP 损伤时, 后上盂唇部分由于失去了对肱骨头的间隔作用 (The Spacer Effect), 导致肱骨头后上脱位, 进而导致肩袖损伤的发生。各研究成果的时间脉络图归纳如表 4。

表 4 | 有限元对盂唇 SLAP 损伤机制的时间脉络图

发表时间	作者	发现
2014	HWANG 等 ^[36]	肱骨头上移相较于肱二头肌张力在 SLAP 损伤发生中更占主要作用
2015	HWANG 等 ^[37]	SLAP 损伤盂唇撕裂口大于肱二头肌起始点宽度时, 需行手术治疗
2015	JANG 等 ^[38]	改进了 HWANG 的研究, 并发现后上盂唇部分损伤, 会导致 SLAP 损伤进展合并肩袖损伤的发生

表注: SLAP 为上盂唇前后向

但肩关节脱位发生时, 除造成关节盂盂唇、关节盂骨质等结构损伤外, 还会因与肱骨头撞击的相互力学作用, 导致肱骨头处的骨质损伤, 这种双极骨缺损将导致肩关节复位后脱位的再发生。有研究表明, 双

极骨缺损的发生在复发性肩关节前向不稳患者中甚至可高达 68%–90% 及 77%–100%^[39-40]。WALIA 等^[41]通过构建包含 4 种宽度缺损 (12.5%, 25%, 37.5% 及 50%) 缺损的关节盂骨性 Bankart 损伤及 4 种直径缺损 (6%, 19%, 31%, 44%) 的肱骨头 Hill-Sach 损伤模型, 采用位移控制的准静态分析方法, 得出双极骨缺损的盂肱关节稳定性较仅骨性 Bankart 损伤的盂肱稳定性显著降低, 其在实验运算后得出 12.5% 骨性 Bankart 损伤联合 19% Hill-Sach 损伤其盂肱关节稳定性约等于仅 25% 骨性 bankart 损伤, 而当关节孟处存在 25% 骨性 Bankart 损伤, 正是行植骨手术治疗的临界点。对双极骨缺损的手术决策, 早在十余年前, 便有学者提出肩胛孟轨迹的概念进行术前评估^[42]。然而这一概念的准确性, 如今仍存在争议。通过构建肩关节有限元模型, PECORE 等^[43]重现了双极骨缺损病理情况, 并对肩胛孟轨迹进行测量, 虽然其计算数值与其他研究结果相近, 但也发现肩胛孟轨迹的参数会受到盂肱关节应力的影响, 因此认为肩胛孟轨迹不应作为评估前盂肱关节不稳的普遍参考。随后, 伍晨亮等^[44]也在其研究中指出, 目前的肩胛孟轨迹模型存在诸如肩胛孟轨迹宽度公式系数有待优化、缺少对肩胛孟凹度的考量等缺陷。有限元分析应用于双极骨缺损的探讨如图 3 所示。

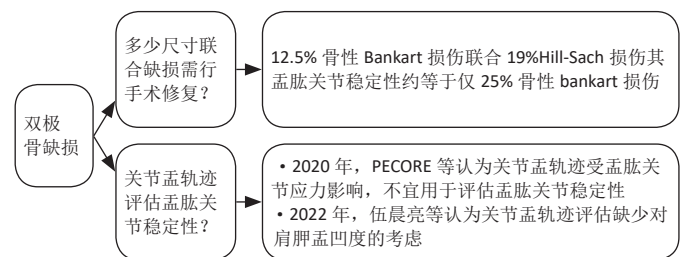


图 3 | 有限元分析法在双极骨缺损领域的探讨

对于盂唇损伤的治疗, 多根据损伤程度大小进行手术决策, 然而既往研究多聚焦于非生理情况下的临界值探讨。KLEMT 等^[45]通过模拟完整肩关节模型在完成 30 次日常生活活动时, 评估肩胛孟骨缺损大小对发生脱位的风险, 从而认为当肩胛孟缺损长度大于 16% 时, 在日常生活活动中, 脱位风险明显增高, 此时即需行植骨手术治疗。这项研究进一步扩大了行植骨手术的肩胛孟缺损临界值。除对手术决策进行指导外, 有限元技术也运用于对手术方式的深入探讨。INOUE 等^[46]通过构建 Bankart 修复术肩关节有限元模型, 分别比较了去除及保留肩胛孟前下软骨的 2 种 Bankart 修复术, 进而探讨 Bankart 修复术后出现的肩胛孟骨吸收现象, 并得出保留软骨并修复盂肱韧带复合体的手术方式, 能够避免应力屏蔽 (Stress Shielding) 现象的发生, 从而使得手术预后更佳。SANO 等^[47]则通过对比改良 Bristow 和 Latarjet 术这两种骨性 Bankart 植骨修复手术方式, 根据植骨块的应力分布, 得出两种术式的优劣: ① Latarjet 手术由于植骨块近端应力较低, 容易出现应力屏蔽 (Stress Shielding) 现象而导致近端骨吸收、移植骨失败; ②改良 Bristow 术则由于应力过于集中于固定螺钉处, 使得术后固定螺钉断裂的风险增加。UNSAI 等^[48]则对比了传统 Latarjet 及等角 Latarjet 两种手术方式的应力分布情况, 并认为虽然等角 Latarjet 手术提供了更佳的速度挡作用, 避免了肩关节脱位的发生, 但同时也导致了移植骨块近端应力减小, 术后可能由于应力屏蔽作用导致骨吸收, 且肩胛孟缺损宽度小于 35% 时, 更不宜选用等角 Latarjet 技术进行治疗。

借助有限元分析方法, 实现了切实有效的盂唇损伤发生机制及治疗方式等诸多方面的探讨、研究, 对临床治疗方式决策也起到了指导作用。近年来, 随着国内运动医学领域的不断发展, 以往难以治疗的诸如肩关节创伤后习惯性脱位等疾病, 也慢慢得以攻克。有限元分析从早年的材料赋值等探讨得以奠基, 到如今模拟术后固定效能、指导手术决策, 成为了临床工作不可或缺的一环。

2.4 肩关节置换的有限元研究 自 1950 年 NEER 首次提出半肩关节置换术治疗肩关节病变^[49], 由于肩关节独特的结构, 后续不断发展出全肩关节置换术、反式肩关节置换术等其他术式, 肩关节置换术的手术适应症扩大到治疗巨大肩袖损伤、严重炎性关节炎等众多领域^[50-53]。随着有限元技术的发展, 对于临床上常见的手术技巧、手术方式的探讨, 也在不

断深入。

由于肩关节置换术中肱骨、肩胛骨部分同时存在密质骨、松质骨，且内植物人工关节与人体骨质间材料差异的影响，对肩关节置换术建模的材料赋值、运算收敛提出了不小的挑战。REEVES等^[54]通过对比对模型赋予不同的骨小梁刚度关系，并观测评估：①种植体-骨骼接触百分比；②体积-质量的Von Mises应力变化；③吸收/形成骨量与初始骨量的百分比3个指标，认为在肩关节置换术研究中，可对骨骼结构赋予人体其他部位的非均质数据，并不会对运算结果造成大的误差，这一研究结果也支持了既往对骨小梁赋值的其他简化方式^[55]。

在假体设计方面，有限元分析技术也贡献了一些研究成果。众所周知，内植物材料特性与周围骨质结构差异会导致肩关节置换术后的不良预后，诸如老年骨质疏松患者，容易因应力屏蔽作用致骨吸收现象的发生。SOLTANMOHAMMADJ等^[56]由髋关节置换术中股骨端空心柄的启发，对肩关节置换术中肱骨端空心柄结构进行有限元分析，并认为在保持空心柄强度的前提下，空心柄仅减少了少部分骨吸收骨量，相对于髋关节假体的空心柄使用，肩关节假体使用空心柄结构对患者受益度有限。ARENAS-MIQUELEZ等^[57]利用CT数据建模，分析对比了肱骨端不同颈干角假体数据，认为145°颈干角结合肩盂球4mm的偏侧化和2mm的下位偏心处理对术后活动范围改善最为明显。这两项研究均对之后的肩关节假体设计提供了一定的理论支持及指导。

对于手术方式的探讨，半肩关节置换由于对肩胛盂结构要求完整、骨质要求良好等术前要求，较少对其进行有限元分析研究，目前主要集中在对全肩关节置换术及反式全肩关节置换术的研究。BOLA等^[58]通过对体外全肩关节置换术后模型进行有限元建模分析，得出全肩关节置换术后，盂肱关节最大主应变集中在肩胛骨前端，最小主应变在肩胛骨后侧，肱骨侧的前后区域应变相近，这一研究对行全肩关节置换术后假体周围骨折的发生部位具备前瞻性预测作用。相比于以恢复正常解剖结构为主的全肩关节置换术，当患者合并有严重肩袖损伤的肩关节骨性关节炎时，反式全肩关节置换术具备更广泛的适应证^[59]。但由于假体设计及手术技术等原因，临床上最常见的手术并发症就是肩胛骨切迹。ELWELL等^[60]通过尸体肩关节CT模型，模拟了在临床上为避免肩胛骨切迹发生所采用的偏移旋转中心的手术技术，发现虽然偏移旋转中心使得术后肩关节内收活动度增大，达到了避免肩胛骨切迹发生的目的，但同时也使得肩盂基座微动产生，使得内植物寿命将会降低。

肩关节置换术的有限元研究由于受限于多组件材料赋值复杂、难以准确模拟体内各组织间负荷及边界条件等原因，较研究其他肩部组织结构的有限元研究更少，但随着有限元技术的不断发展及对有限元研究方法的不断探索优化，未来的工作必将涉及更多目前尚未解决的问题，诸如关节置换术后关节不稳、脱位，不同手术技术对术后康复的预测等方面。

3 总结与展望 Summary and prospects

3.1 既往他人在该领域研究的贡献和存在的问题 有限元分析方法起源于航空工程中的矩阵分析，借助计算机技术的发展及各种理论力学方法，实现对材料建模应力、应变的前瞻性分析研究，从而优化模型，降低预期成本及可能出现的风险。有限元分析方法自利用于骨科生物力学领域以来，相较于传统的体内、体外实验而言，具有克服伦理争议、技术要求较低、经济实惠等方面优势。目前多应用于治疗方案决策、预测手术效果、优化手术技巧等诸多与临床工作联系紧密的领域。然而，受限于人体各组织结构复杂性及有限元分析过程中材料属性、边界条件及应力载荷等基础研究的不足，各研究结果往往难以精准模拟真实人体中的实际情况，只能提供具有一定参考意义的实验结果，除少数研究结合人体实验或尸体试验加以验证外，大多数研究在这方面尚有欠缺。

3.2 作者综述区别于他人他篇的特点 既往文献多集中于借助有限元分析方法探讨单个领域的研究进展，国内外少有人对肩关节复合体领域的多疾病进行有限元分析方法的综述。该文通过对近十余年来有限元分析文献的总结归纳，证实了有限元分析对研究肩关节生理功能及相关临床问题的广泛前景，提升了对肩关节生物力学方面的理解。

3.3 综述的局限性 现阶段关于肩关节复合体探讨的有限元分析文献报道，普遍存在如下局限性：①样本数目过少，样本不具有代表性；②建

模技术参差不齐、为简化运算删除周围重要组织结构；③肩关节运动方式未能实际符合人体真实情况；④缺少对特定结构的材料属性及边界条件的基础报道研究等问题，导致各个实验研究结果仅能反映大体趋势，未能具备坚定信服力。

3.4 综述的重要意义 该文通过对近十余年的肩关节复合体相关有限元方面的研究，发现以往肩关节有限元研究所存在的诸如：简化肩关节周围组织结构、组织材料赋值困难、模拟复杂人体生理结构的有限元模型负荷加载及各模型间边界条件设定等问题，近些年的研究越来越多致力于去探索改进。更令人欣慰的是近些年国内外不断出现对有限元实验模型的网站公开及相关模型数据库的建立^[8, 14]，使得有限元分析研究具备了传统实验室研究相近的实验数据精确性、可复制性，也为后来的有限元分析深入提供了统一、具备可考据性的数据来源。相信随着计算机技术及软件开发等方面的不断发展，未来的有限元研究必然成为疾病发生发展机制、术前手术规划、手术方式决策等方面不可或缺的实用工具。

致谢：感谢济南市科学技术局临床医学科技创新计划、济南市科学技术局科技发展计划项目对本文的资金支持。

作者贡献：文章设计者、资料收集者、数据分析者均为曾显源。由第一作者曾显源撰写论文。第二、三作者参与文献检索及文章修改。通讯作者张涛、张恩水均参与论文审核。

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中不存在利益冲突。

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。

版权转让：文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范：文章撰写遵守了《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA声明)；出版前经过专业反剽窃文献检测系统进行3次文字和图表查重；经小同行外审专家双盲审稿，同行评议认为符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- 1] ABOUELKHAIR F, DUPREY S. Assessing shoulder posture ergonomics thanks to a finite element analysis. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2012; 15 Suppl 1:348-349.
- 2] ZHENG M, ZOU Z, BARTOLO PJ, et al. Finite element models of the human shoulder complex: a review of their clinical implications and modelling techniques. *Int J Numer Method Biomed Eng*. 2017;33(2):e02777.
- 3] BOLSTERLEE B, VEEGER DH, CHADWICK EK. Clinical applications of musculoskeletal modelling for the shoulder and upper limb. *Med Biol Eng Comput*. 2013;51(9):953-963.
- 4] DAHAN G, TRABELSI N, SAFRAN O, et al. Finite element analyses for predicting anatomical neck fractures in the proximal humerus. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2019;68:114-121.
- 5] MENEGAZ GL, GOMIDE LC, ARAUJO CA. Biomechanical evaluation of acromioclavicular joint reconstructions using a 3-dimensional model based on the finite element method. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2019;70:170-176.
- 6] GAO R, ZHANG W, YANG Y, et al. Evaluation of the coracoid bone tunnel placement on Dog Bone button fixation for acromioclavicular joint dislocation: a cadaver study combined with finite element analysis. *BMC Musculoskelet Disord*. 2023;24(1):18.
- 7] WANG C, MA XY, LU LT, et al. A finite element model of the shoulder: application to the changes of biomechanical environment induced by postoperative malrotation of humeral shaft fracture. *BMC Musculoskelet Disord*. 2022;23(1):525.
- 8] ELWELL JA, ATHWAL GS, WILLING R. Development and validation of a muscle wrapping model applied to intact and reverse total shoulder arthroplasty shoulders. *J Orthop Res*. 2018;36(12):3308-3317.
- 9] BOLA M, SIMOES J, RAMOS A. Finite element model validation based on an experimental model of the intact shoulder joint. *Med Eng Phys*. 2021;87:1-8.
- 10] 周建华, 王跃. 有限元分析在骨科中的应用及研究进展[J]. *实用医院临床杂志*, 2018,15(1):205-208.
- 11] HOFFMANN M, BEGON M, LAFON Y, et al. Influence of glenohumeral joint muscle insertion on moment arms using a finite element model. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2020;23(14):1117-1126.
- 12] HIK F, ACKLAND DC. The moment arms of the muscles spanning the glenohumeral joint: a systematic review. *J Anat*. 2019;234(1):1-15.

- [13] KNOWLES NK, LANGOHR GDG, FAIEGHI M, et al. A comparison of density-modulus relationships used in finite element modeling of the shoulder. *Med Eng Phys.* 2019;66:40-46.
- [14] SADEQI S, BAUMANN AP, GOEL VK, et al. A Validated Open-Source Shoulder Finite Element Model and Investigation of the Effect of Analysis Precision. *Ann Biomed Eng.* 2023;51(1):24-33.
- [15] WEBB JD, BLEMKER SS, DELP SL. 3D finite element models of shoulder muscles for computing lines of actions and moment arms. *Comput Methods Biomech Biomed Enging.* 2012;17(8):829-837.
- [16] KANATLI U, GEMALMAZ HC, OZTURK BY, et al. The role of radiological subacromial distance measurements in the subacromial impingement syndrome. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2013;23(3):317-322.
- [17] 范宁, 藏磊, 袁硕, 等. 有限元分析在肩袖撕裂中的应用进展 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2021,23(8):732-736.
- [18] GARVING C, JAKOB S, BAUER I, et al. Impingement Syndrome of the Shoulder. *Dtsch Arztebl Int.* 2017;114(45):765-776.
- [19] EL-AMIN S F, 3RD, MAFFULLI N, MAI MC, et al. Coracoid Impingement and Morphology Is Associated with Fatty Infiltration and Rotator Cuff Tears. *J Clin Med.* 2022;11(9):2661.
- [20] VIEHOFER AF, GERBER C, FAVRE P, et al. A larger critical shoulder angle requires more rotator cuff activity to preserve joint stability. *J Orthop Res.* 2016;34(6):961-968.
- [21] INOUE A, CHOSA E, GOTO K, et al. Nonlinear stress analysis of the supraspinatus tendon using three-dimensional finite element analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013;21(5):1151-1157.
- [22] 李立. 肩关节复合体有限元建模及肱骨外展动作中肩袖生物力学分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [23] ISLAN MARCOS M, LECHOSA URQUIJO E, BLAYA HARO F, et al. Behavior under Load of A Human Shoulder: Finite Element Simulation and Analysis. *J Med Syst.* 2019;43(5):132.
- [24] MATTHEW MILLER R, THUNES J, MUSAHL V, et al. A Validated, Specimen-Specific Finite Element Model of the Supraspinatus Tendon Mechanical Environment. *J Biomech Eng.* 2019;141(11):111003.
- [25] SANO H, HATTA T, YAMAMOTO N, et al. Stress distribution within rotator cuff tendons with a crescent-shaped and an L-shaped tear. *Am J Sports Med.* 2013;41(10):2262-2269.
- [26] 邢秋娟, 赵东峰, 戴薇薇, 等. 冈上肌部分损伤对肌腱应力分布影响的有限元分析 [J]. *实用骨科杂志*, 2018,24(6):519-522.
- [27] MILLER RM, THUNES J, MAITI S, et al. Effects of Tendon Degeneration on Predictions of Supraspinatus Tear Propagation. *Ann Biomed Eng.* 2019;47(1):154-161.
- [28] FERRER GA, FORTUNATO RN, MUSAHL V, et al. Effect of localized tendon remodeling on supraspinatus tear propagation. *J Biomech.* 2020;108:109903.
- [29] MANTOVANI M, PELLEGRINI A, GAROFALO P, et al. A 3D finite element model for geometrical and mechanical comparison of different supraspinatus repair techniques. *J Shoulder Elbow Surg.* 2016;25(4):557-563.
- [30] 包呼日查, 齐岩松, 陶立元, 等. 肩袖损伤修补金属锚钉置入角度——有限元分析 [J]. *中华肩肘外科电子杂志*, 2019,7(1):56-62.
- [31] CHEVALIER Y. Numerical Methodology to Evaluate the Effects of Bone Density and Cement Augmentation on Fixation Stiffness of Bone-Anchoring Devices. *J Biomech Eng.* 2015;137(9). doi: 10.1115/1.4030943.
- [32] SANO H, IMAGAWA K, YAMAMOTO N, et al. Predicting failures of suture anchors used for rotator cuff repair: a CT-based 3-dimensional finite element analysis. *Biomed Mater Eng.* 2015;25(4):371-380.
- [33] SANO H, TOKUNAGA M, NOGUCHI M, et al. Comparison of fixation properties between coil-type and screw-type anchors for rotator cuff repair: A virtual pullout testing using 3-dimensional finite element method. *J Orthop Sci.* 2016;21(4):452-457.
- [34] KLEMT C, NOLTE D, GRIGORIADIS G, et al. The contribution of the glenoid labrum to glenohumeral stability under physiological joint loading using finite element analysis. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2017;20(15):1613-1622.
- [35] DRURY NJ, ELLIS BJ, WEISS JA, et al. The impact of glenoid labrum thickness and modulus on labrum and glenohumeral capsule function. *J Biomech Eng.* 2010;132(12):121003.
- [36] HWANG E, CARPENTER JE, HUGHES RE, et al. Effects of biceps tension and superior humeral head translation on the glenoid labrum. *J Orthop Res.* 2014;32(11):1424-1429.
- [37] HWANG E, HUGHES RE, PALMER ML, et al. Effects of biceps tension on the torn superior glenoid labrum. *J Orthop Res.* 2015;33(10):1545-1551.
- [38] JANG SW, YOO YS, LEE HY, et al. Stress Distribution in Superior Labral Complex and Rotator Cuff During In Vivo Shoulder Motion: A Finite Element Analysis. *Arthroscopy.* 2015;31(11):2073-2081.
- [39] NAKAGAWA S, IUCHI R, HANAI H, et al. The Development Process of Bipolar Bone Defects From Primary to Recurrent Instability in Shoulders With Traumatic Anterior Instability. *Am J Sports Med.* 2019;47(3):695-703.
- [40] GOLJANIN P, PEEBLES L, ARNER JW, et al. Advanced 3-Dimensional Characterization of Hill-Sachs Lesions in 100 Anterior Shoulder Instability Patients. *Arthroscopy.* 2021;37(11):3255-3261.
- [41] WALIA P, MINIACI A, JONES MH, et al. Influence of Combined Hill-Sachs and Bony Bankart Defects on Range of Motion in Anterior Instability of the Shoulder in a Finite Element Model. *Arthroscopy.* 2015;31(11):2119-2127.
- [42] YAMAMOTO N, ITOI E, ABE H, et al. Contact between the glenoid and the humeral head in abduction, external rotation, and horizontal extension: a new concept of glenoid track. *J Shoulder Elbow Surg.* 2007;16(5):649-656.
- [43] PECORA JOR, NEVES JUNIOR AT, ROESLER CRM, et al. Glenoid track evaluation by a validated finite-element shoulder numerical model. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2020;106(4):735-742.
- [44] 伍晨亮, 赵金忠. 肩胛盂轨迹概念在肩关节前向不稳诊疗中的应用与挑战 [J]. *国际骨科学杂志*, 2022,43:261-266.
- [45] KLEMT C, TODERITA D, NOLTE D, et al. The critical size of a defect in the glenoid causing anterior instability of the shoulder after a Bankart repair, under physiological joint loading. *Bone Joint J.* 2019;101-B(1):68-74.
- [46] INOUE K, SUENAGA N, OIZUMI N, et al. Glenoid bone resorption after Bankart repair: finite element analysis of postoperative stress distribution of the glenoid. *J Shoulder Elbow Surg.* 2021;30(1):188-193.
- [47] SANO H, KOMATSUDA T, ABE H, et al. Intra-articular biomechanical environment following modified Bristow and Latarjet procedures in shoulders with large glenoid defects: relationship with postoperative complications. *J Shoulder Elbow Surg.* 2021;30(10):2260-2269.
- [48] UNSAL SS, YILDIRIM T, KAYALAR M. Comparison of two coracoid process transfer techniques on stress shielding using three-dimensional finite-element model. *J Orthop Surg Res.* 2022;17(1):371.
- [49] NEER CS 2ND, CRAIG EV, FUKUDA H. Cuff-tear arthropathy. *J Bone Joint Surg Am.* 1983;65(9):1232-1244.
- [50] RUGG CM, COUGHLAN MJ, LANSDOWN DA. Reverse Total Shoulder Arthroplasty: Biomechanics and Indications. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2019;12(4):542-553.
- [51] ERNSTBRUNNER L, ANDRONIC O, GRUBHOFFER F, et al. Long-term results of reverse total shoulder arthroplasty for rotator cuff dysfunction: a systematic review of longitudinal outcomes. *J Shoulder Elbow Surg.* 2019;28(4):774-781.
- [52] HARTINIEN E G, BELGAID V, LINO T, et al. Reverse versus anatomical shoulder arthroplasty in patients with intact rotator cuff. *Int Orthop.* 2020;44(11):2395-2405.
- [53] AIM F, MARION B, KERROUMI Y, et al. One- or two-stage exchange for periprosthetic shoulder infection: Systematic review and meta-analysis. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2020;106(1):5-15.
- [54] REEVES JM, ATHWAL GS, JOHNSON JA, et al. The Effect of Inhomogeneous Trabecular Stiffness Relationship Selection on Finite Element Outcomes for Shoulder Arthroplasty. *J Biomech Eng.* 2019;141(3). doi: 10.1115/1.4042172.
- [55] REIMERINGER M, NUNO N, DESMARAIS-TREPANIER C, et al. The influence of uncemented femoral stem length and design on its primary stability: a finite element analysis. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2013;16(11):1221-1231.
- [56] SOLTANMOHAMMADI P, TAVAKOLI A, LANGOHR GDG, et al. Structural analysis of hollow versus solid-stemmed shoulder implants of proximal humeri with different bone qualities. *J Orthop Res.* 2022;40(3):674-684.
- [57] ARENAS-MIQUELEZ A, MURPHY RJ, ROSA A, et al. Impact of humeral and glenoid component variations on range of motion in reverse geometry total shoulder arthroplasty: a standardized computer model study. *J Shoulder Elbow Surg.* 2021;30(4):763-771.
- [58] BOLA M, SIMOES JA, RAMOS A. Finite element modelling and experimental validation of a total implanted shoulder joint. *Comput Methods Programs Biomed.* 2021;207:106158.
- [59] 柳金浪, 段志豪, 周游. 反式全肩关节置换的研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021,29:2063-2066.
- [60] ELWELL J, CHOI J, WILLING R. Quantifying the competing relationship between adduction range of motion and baseplate micromotion with lateralization of reverse total shoulder arthroplasty. *J Biomech.* 2017;52:24-30.

(责任编辑: ZN, QY, JL)