

单排和双排肩袖缝合桥力学研究

刘来有, 吕智

(山西医科大学第二医院骨科, 山西 太原 030001)

【摘要】 目的: 从生物力学的角度比较分析单排带线锚钉固定修复肩袖损伤和双排缝合桥固定修复肩袖损伤的力学差异。**方法:** 将健康成年人肩关节的 CT 扫描数据依次导入 Mimics, Geomagics 和 Hypermesh 中进行两种修复模型的逆向重建、材料赋属和网格划分等操作, 并设计出冈上肌撕裂的情况, 处理完后将其导入 ABAQUS 软件中对其施加载荷与边界条件, 模拟锚钉固定修复完成后肩关节前屈 15°、30°, 内旋 15°、30° 这 4 种工况。比较两种修复模型在 4 种工况下肩袖冈上肌, 带线锚钉的应力变化。**结果:** 两种前屈工况下双排缝合桥固定模型中冈上肌所受应力值分别比单排固定修复模型中冈上肌所受应力值小 8.3% 和 12%。两种内旋工况下, 双排缝合桥固定模型中冈上肌所受应力值分别比单排固定修复模型中冈上肌所受应力值小 47% 和 48%。**结论:** 双排 4 枚锚钉之间的“负荷共享”效应使应力分布更为分散, 增大了冈上肌与肱骨之间的接触面积, 减小了锚钉的受力, 避免了严重的应力集中现象, 从生物力学角度解释了双排缝合桥固定方法的优势。

【关键词】 肩关节; 修复外科手术; 生物力学现象

中图分类号: R684

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2021.06.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on the mechanical differences between single-row belt rivets and double-row suture bridge in repairing rotator cuff injury LIU Lai-you and LYU Zhi. Department of Orthopaedics, the Second Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi, China

ABSTRACT Objective: To compare and analyze the mechanical differences between single-row suture anchor fixation for repairing rotator cuff injuries and double-row suture bridges for repairing rotator cuff injuries from a biomechanical perspective. **Methods:** The CT scan data of healthy adult shoulder joint were imported into Mimics, Geomagics and Hypermesh to carry out reverse reconstruction of two repair models, material assignment and mesh division, and the tearing of supraspinatus muscle was designed. After treatments, the load and boundary conditions were applied to the shoulder joint in ABAQUS software. The shoulder joint was fixed with four working conditions including flexion 15°, flexion 30°, internal rotation 15° and internal rotation 30° after anchor fixation and repair. The stress changes of the upper rotator cuff muscle and the anchor with thread were compared under these four conditions. **Results:** Under the two flexion conditions, the stress of the supraspinatus in the double row suture bridge fixation model was 8.3% and 12% less than that in the single-row suture anchor fixation, respectively. Under the two internal rotation conditions, the stress of supraspinatus in the double row suture bridge fixation model was 47% and 48% less than that in the single row fixation repair model, respectively. **Conclusion:** The "load sharing" effect between the two rows of four anchors makes the stress distribution more dispersed, increases the contact area between the supraspinatus muscle and the humerus, reduces the stress of the anchor, avoids the serious stress concentration phenomenon, and explains the advantages of the fixation method of the double row suture bridge from the biomechanical angle.

KEYWORDS Shoulder Joint; Reconstructive surgical procedures; Biomechanical phenomena

冈上肌在肩关节运动中起着重要的作用, 同时也是肩袖肌肉中最容易损伤的部位^[1-2]。目前临床上治疗 <3 cm 的小型肩袖损伤常用的固定方法为单排带线锚钉固定技术, 但该方法作用下冈上肌与肱骨头的接触面积有限, 面对较大的肩袖撕裂并不适用, 而双排缝合桥技术则较好地解决了这个问题, 锚钉之间形成的网状结构缝线可以对损伤区域进行加

压, 最大限度地增大肌肉与骨面的接触面积, 利于后期的恢复^[3-4]。虽然从理论上双排缝合桥固定要优于单排带线锚钉固定技术, 但针对这两种修复方法的力学研究目前还不完善, 因此笔者构建了治疗冈上肌断裂的单排带线锚钉修复模型和双排缝合桥修复模型, 比较两种修复固定手法作用下肩关节各部在不同工况下的生物力学差异。

1 资料与方法

1.1 肩关节模型逆向重建

选取 1 名男性志愿者, 45 岁, 73 kg, 肩关节无既

通讯作者: 吕智 E-mail: 1191866858@qq.com

Corresponding author: LYU Zhi E-mail: 1191866858@qq.com

往外伤史。利用螺旋 CT 扫描机对志愿者左肩进行扫描,在 Mimics 软件中对扫描得到的数据进行提取,重建出包括肩胛骨、肱骨、锁骨等结构在内的左肩模型。根据各部位的灰度值进行材料的赋予,具体属性见表 1^[5-7]。将重建完毕的模型以 stl 格式导入 Geomagics 软件中对模型进一步降噪和修补,最终完成模型的实体化,见图 1。完成骨骼的实体化之后,根据该志愿者 CT 扫描数据,计算出其肩袖所包含肌肉组织的起止长度和相应曲率,在 3-matic 软件中绘制出肩胛下肌、冈上肌、冈下肌、小圆肌等肌肉组织,在肱骨大结节和肩袖组织的外侧缘肱骨大结节处设计直径 2 mm 骨道,用于锚钉的击入,单排和双排肩袖缝合置钉位置简图见图 2,模型中锚钉与肌肉的连接用线性弹簧代替,最后对其进行实体化操作。除此之外,根据真实带线锚钉的几何特征,在 3-matic 软件中绘制出带线锚钉,长 7 mm,直径 2 mm,锚钉材料选用 PEEK。最后将带线锚钉、肩关节各骨骼结构以及肌肉模型导入 Hypermesh 软件中对其进行网格划分,网格类型为 C3D10M,带线锚钉网格尺寸为 0.2 mm,骨头与肌肉网格尺寸为 2 mm。

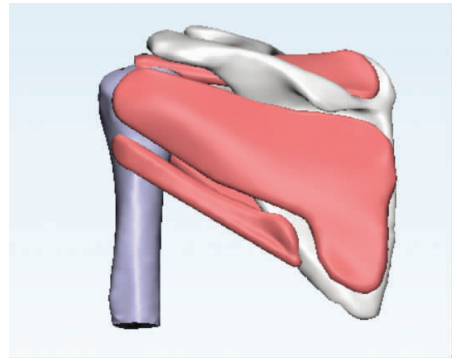


图 1 左肩实体化模型
Fig.1 Left shoulder solidification model

组织采用绑定约束,带线锚钉与骨骼采用接触约束,摩擦系数设置为 0.2^[8]。

本课题主要研究两种固定修复模型在前屈 15°、30°,内旋 15°、30°这 4 种工况下的冈上肌生物力学行为。在肱骨头心建立局部坐标系,让肱骨绕局部坐标系中不同坐标轴旋转来实现前屈和内旋运动。至此,单排带线锚钉固定修复有限元模型和双排缝合桥固定修复有限元模型建立完毕,见图 3。

2 结果

2.1 模型有效性验证

肩关节中不同肩袖肌肉所起的作用各不相同,利用两种肩袖损伤修复模型对肩关节的外旋运动进行了模拟,统计了外旋 30°工况下肩袖各肌肉受力情况(表 2)。从表中可以看出,在外旋 30°工况下,两种修复模型中肩胛下肌的受力是最大的,说明肩胛下肌在外旋运动时起主要运动,这一结果与朱鸣镝等^[9],何仿等^[10]利用成人大体肩关节进行力学研究得出的结论一致,验证了模型的有效性。

2.2 前屈工况下两种模型中冈上肌应力学行为

从肩关节前屈 15°时冈上肌的受力变化(图 4)可以看出,单排带线锚钉修复模型中冈上肌受力大于双排缝合桥模型中冈上肌的受力,从应力分布的角度看,双排缝合桥修复模型中冈上肌的应力分布更加均匀。

从肩关节前屈 30°时冈上肌的应力数值来看(图 5),肩关节前屈角度变大,明显增加了两种模型中冈上肌所受应力,但单排带线锚钉模型中冈上肌的受力为 273.39 MPa,依然大于双排缝合桥模型中冈上肌所受应力值 254.8 MPa。而从应力分布情况来看,双排缝合桥模型中冈上肌承受的应力范围要更广一些。

表 1 肩关节模型各部件材料属性

Tab.1 Material properties of various parts of shoulder joint model

项目	弹性模量(MPa)	泊松比
皮质骨	17 000	0.28
锚钉(PEEK)	3 800	0.28
肌腱	1 200	0.4
肌腹	1.08	0.4
软骨	400	0.3

1.2 肩关节有限元模型建立

将逆向重建完的肩关节模型与带线锚钉模型导入 ABAQUS 有限元软件中,锚钉以 90°植入骨道内。根据真实人体肩关节的运动,将锁骨和肩胛骨远端所有节点固定,约束其全部自由度。肩袖各肌肉与骨

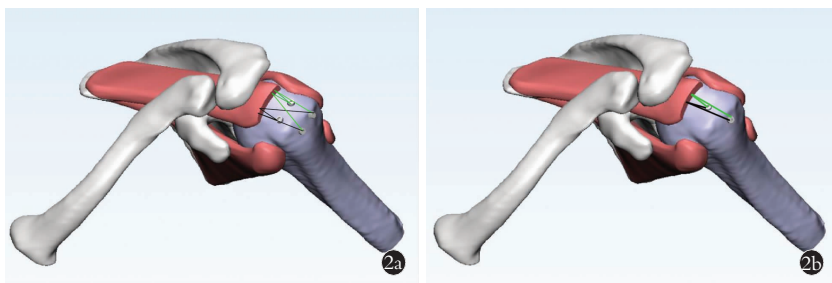


图 2 单排(2a)和双排(2b)肩袖缝合模型置钉位置示意图
Fig.2 Single(2a) and double(2b) row rotator cuff stitching model diagram



图 3 左肩有限元模型
Fig.3 Left shoulder finite element model

2.3 前屈工况下两种模型中带线锚钉应力学行为
在肩关节前屈 15°工况下(图 6),单排带线锚钉模型中带线锚钉所受应力值为 236.9 MPa,远远大于双排缝合桥模型中锚钉的受力 146.1 MPa。而从应力分布的角度也可以明显的看到,单排模型中锚钉上部出现了明显的应力集中情况,而双排缝合桥模型中 4 枚锚钉受力均匀,没有出现应力集中现象。

从前屈 30°工况下两种模型中带线锚钉受力情况(图 7)可以看出,肩关节前屈角度增大,也相应使带线锚钉受力增加,两种模型中带线锚钉的受力分别达到了 471.0 MPa 和 290.7 MPa。而从应力分布的角度看,单排模型中带线锚钉在锚钉上端产生了严重的应力集中现象,而双排缝合桥模型中 4 枚锚钉受力更为均匀。

2.4 内旋工况下两种模型中冈上肌的应力学行为

两种模型中冈上肌在内旋 15°工况下的应力分布几乎没有差别(图 8),但从应力数值上来看,单排模型中冈上肌受力(206.9 MPa)远大于双排缝合桥模型中冈上肌的受力(108.3 MPa)。

从两种模型冈上肌在内旋 30°工况下的应力分布情况(图 9)可以看出,随着内旋角度的增加,两种模型中冈上肌受力均呈现增加的趋势。虽然该工况下两种模型冈上肌的应力分布相差不大。但从数值上看,单排模型中冈上

表 2 外旋 30°两种修复固定方法下肩袖肌肉受力情况 (MPa)

Tab 2 Stress of the lower rotator cuff muscles with two external fixation methods of 30° rotation(MPa)

部位	单排带线锚钉固定	双排缝合桥固定
冈上肌	120.56	289.32
冈下肌	210.24	330.45
小圆肌	273.52	284.25
肩胛下肌	373.15	379.82

肌受力(416.3 MPa)依然大于双排缝合桥模型中冈上肌的受力(217.9MPa)。

2.5 内旋工况下两种模型中带线锚钉应力学行为
从肩关节内旋 15°时带线锚钉的受力情况(图

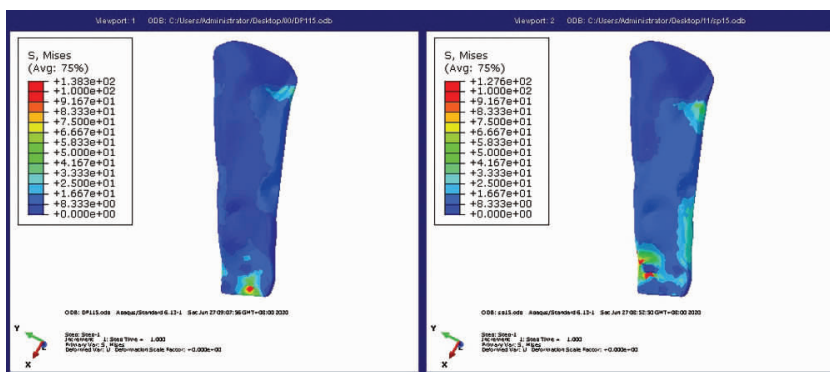


图 4 前屈 15°工况下两种模型中冈上肌的受力情况。左图为单排带线锚钉修复模型冈上肌的受力情况,右图为双排缝合桥修复模型中冈上肌的受力

Fig.4 The stress of supraspinatus muscle in the two models under the condition of forward flexion at 15°. The left picture shows the stress of the supraspinatus muscle repaired by the single-row wire rivet model, and the right picture shows the stress of the supraspinatus muscle repaired by the double-row suture bridge repair model

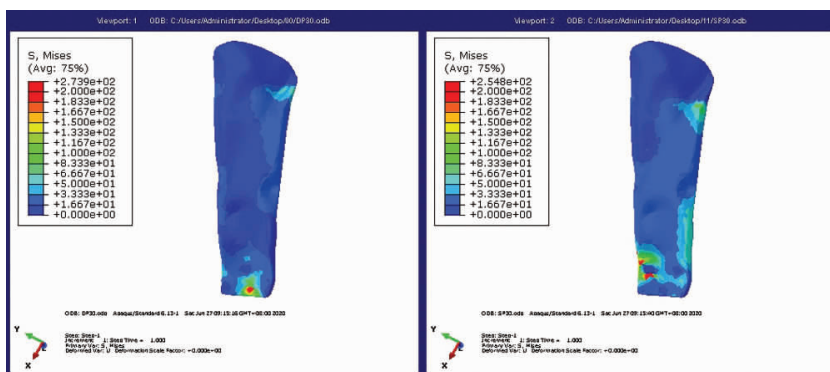


图 5 前屈 30°工况下两种模型中冈上肌的受力情况。左图为单排带线锚钉修复模型冈上肌的受力情况,右图为双排缝合桥修复模型中冈上肌的受力

Fig.5 The stress of supraspinatus muscle in two models under the condition of forward flexion at 30°. The left picture shows the stress of the supraspinatus muscle repaired by a single row of wire rivets, and the right picture shows the stress of the supraspinatus muscle repaired by the double-row suture bridge

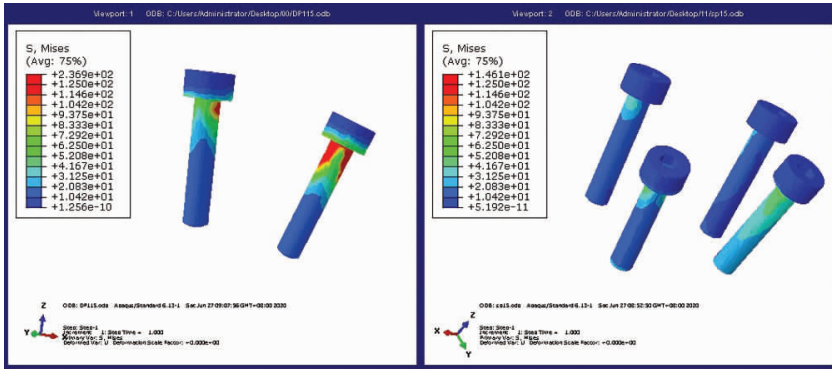


图 6 前屈 15° 工况下两种模型中带线锚钉的受力情况。左图为单排带线锚钉修复模型锚钉的受力情况,右图为双排缝合桥修复模型中锚钉的受力

Fig.6 Stress of wire rivets in the two models under the condition of forward flexion at 15°. The left picture shows the stress of the rivets in the repair model of the single-row line rivet, and the right picture shows the stress of the rivets in the repair model of the double-row suture bridge

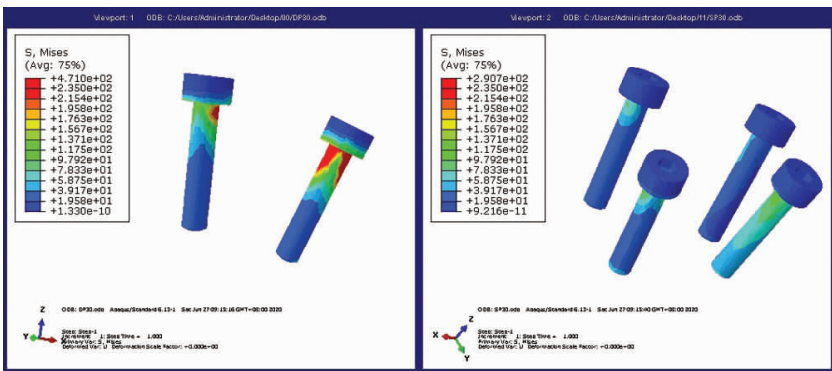


图 7 前屈 30° 工况下两种模型中带线锚钉的受力情况。左图为单排带线锚钉修复模型锚钉的受力情况,右图为双排缝合桥修复模型中锚钉的受力

Fig.7 Stress of wire rivets in two models under the condition of forward flexion at 30°. The left picture shows the stress of the rivets in the repair model of the single-row line rivet, and the right picture shows the stress of the rivets in the repair model of the double-row suture bridge

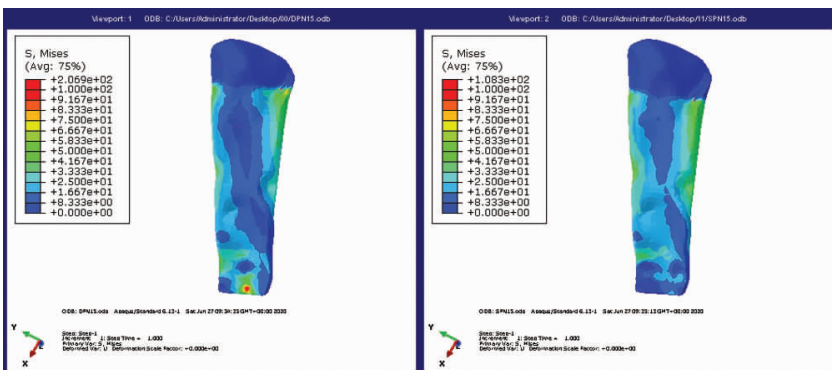


图 8 内旋 15° 工况下两种模型中冈上肌的受力情况。左图为单排带线锚钉修复模型冈上肌的受力情况,右图为双排缝合桥修复模型中冈上肌的受力

Fig.8 The stress of supraspinatus muscle in the two models under the condition of internal rotation 15°. The left picture shows the stress of the supraspinatus muscle repaired by a single row of wire rivets, and the right picture shows the stress of the supraspinatus muscle repaired by the double-row suture bridge

10)可以看出,单排模型中锚钉在其上端产生了明显的应力集中,而双排模型中锚钉受到应力较为平均,且从数值上看,单排锚钉的应力值(91.33 MPa)要大于双排锚钉的应力值(86.42 MPa)。

当肩关节内旋 30° 时(图 11),两种模型中锚钉的受力均明显增加,且单排模型中锚钉的受力(182.5 MPa)要略大于双排模型中锚钉的受力(172.3 MPa)。虽然应力数值差别不明显,但从应力分布来看,单排模型中在锚钉上部产生了高应力集中现象,而双排模型中的锚钉应力分布更为均匀,没有明显的应力集中。

3 讨论

利用单排带线锚钉固定修复治疗小型肩袖撕裂是临床常用的基本方法,但这种方法容易产生术后并发症,术后的再撕裂率达到了 62%^[11]。相比之下,双排缝合桥技术能够彻底清理肱骨大结节愈合区,双排锚钉之间缝合线交叉固定使损伤肩袖肌肉与骨面接触面积增大,促进了损伤愈合,且据 Kim 等^[12]的研究结果显示,双排缝合桥技术治愈后肩袖肌肉的再撕裂率仅为 20%。从理论上讲,双排缝合桥固定修复技术优于单排带线锚钉固定技术,但两种模型中肩袖肌肉的具体应力学行为还不十分清楚。因此,利用有限元分析方法,建立单排带线锚钉修复肩袖冈上肌损伤有限元模型和双排缝合桥修复肩袖冈上肌损伤有限元模型,模拟人体肩关节前屈 15°、30°、内旋 15°、30° 这 4 种工况,以冈上肌和带线锚钉的受力情况作为研究指标,从生物力学的角度比较两种方法之间的差异,为实际临床应用提供理论指导。

3.1 模型有效性讨论

在外旋 30° 工况下,从两种固定修复模型中肩袖肌肉的受力情况(表 2)可以看出,当肩关节在做

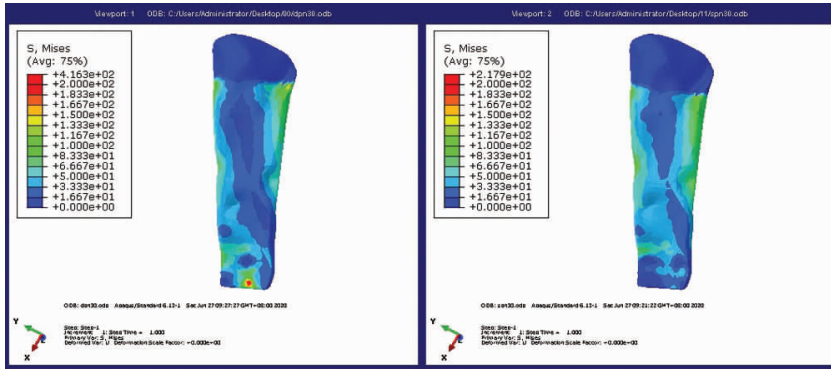


图 9 内旋 30°工况下两种模型中冈上肌的受力情况。左图为单排带线锚钉修复模型冈上肌的受力情况,右图为双排缝合桥修复模型中冈上肌的受力

Fig.9 The stress of supraspinatus muscle in the two models under the condition of internal rotation 30°. The left picture shows the stress of the supraspinatus muscle repaired by a single row of wire rivets, and the right picture shows the stress of the supraspinatus muscle repaired by the double-row suture bridge

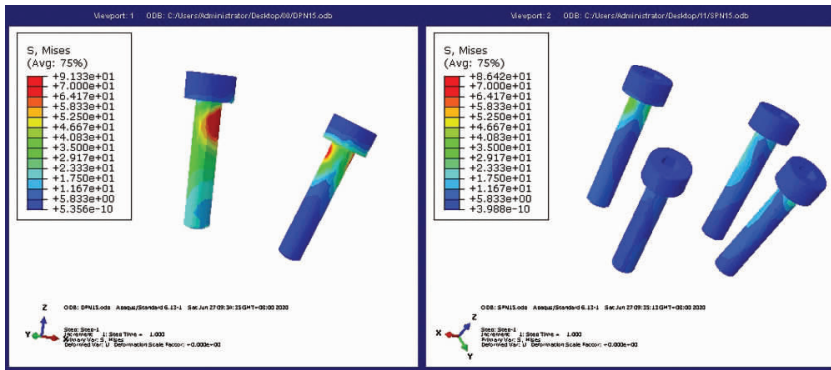


图 10 内旋 15°工况下两种模型中锚钉的受力情况。左图为单排带线锚钉修复模型锚钉的受力情况,右图为双排缝合桥修复模型中锚钉的受力

Fig.10 The stress of the rivets in the two models under the internal rotation of 15°. The left picture shows the stress of the rivets in the repair model of the single-row line rivet, and the right picture shows the stress of the rivets in the repair model of the double-row suture bridge

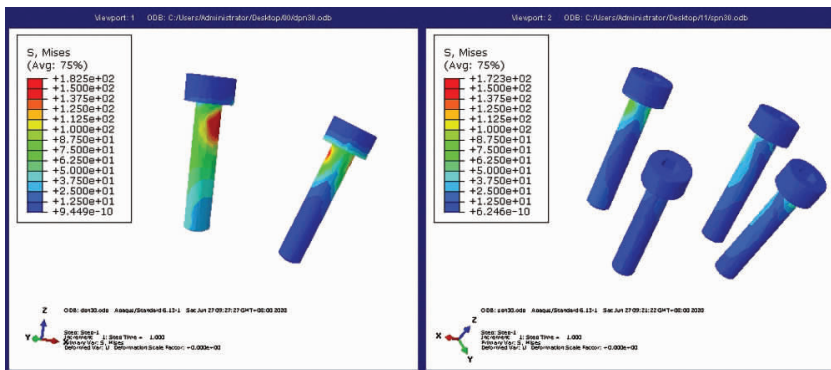


图 11 内旋 30°工况下两种模型中锚钉的受力情况。左图为单排带线锚钉修复模型锚钉的受力情况,右图为双排缝合桥修复模型中锚钉的受力

Fig.11 The stress of the rivets in the two models under the internal rotation of 30°. The left picture shows the stress of the rivets in the repair model of the single-row line rivet, and the right picture shows the stress of the rivets in the repair model of the double-row suture bridge

外旋运动时,两种模型中肩胛下肌所受到的应力值最大,应力值分别为 373.15 MPa, 379.82 MPa。实际人体肩关节做外旋运动时主要由肩胛下肌做驱动,而本课题所得结果亦显示肩关节外旋时肩胛下肌受到应力最大,与肩关节运动解剖学研究结果一致。故本课题所建模型的有效性得到了验证。

3.2 前屈工况下应力分析

从肩关节前屈 15°(图 4)和 30°(图 5)时的两种模型中冈上肌的应力分布云图可以看出,随着肩关节前屈角度的增加,冈上肌的受力明显增加,说明了肩袖肌肉在肩关节运动时起到了重要作用。而在同一个前屈角度下(15°和 30°),单排带线锚钉模型中冈上肌受力比双排缝合桥固定修复模型中冈上肌受力分别大 8.3%和 12%,从应力分布情况来看,双排模型中冈上肌的应力分布更为均匀,说明双排缝合桥固定可以增加肱骨头与肌肉的接触面积,因此相较于单排固定,双排固定冈上肌应力分布均匀,应力值更小。从前屈 15°(图 6)和 30°(图 7)工况带线锚钉所受应力分析,在两种前屈工况下,单排模型中锚钉的应力值达到了 236.9 MPa 和 471.0 MPa,比双排模型中锚钉的受力分别增加了 62%和 60%。说明使用带线锚钉法可以有效固定断裂的肩袖肌肉,且随着锚钉数量的增加,将更好地分担肩关节各部分的应力。单排 2 枚螺钉固定方法虽然也能起到效果,但随着肩关节运动角度的增大,在螺钉上部出现了明显的应力集中现象,而双排 4 枚螺钉的固定形式可以通过锚钉之间的“负荷共享”效应^[7]增强对损伤部位的约束且利于减少锚钉自身的应力,有利于患者的恢复。

3.3 内旋工况下应力分析

肩关节内旋 15°(图 8)和内旋 30°(图 9)工况下,虽然两种模型

中冈上肌的应力分布没有明显的差异,但双排缝合桥模型中冈上肌的受力较小,两种内旋工况下分别比单排模型中冈上肌受力小 47% 和 48%,说明单排带线锚钉固定时肌肉与肱骨表面未能充分接触,产生了局部应力集中。从两种模型在肩关节两种内旋工况下带线锚钉的受力情况(图 9, 10)可以看出,增大内旋角度会使带线锚钉受力增加,说明带线锚钉在修复模型中起到了很好的固定作用。而在同一内旋角度下(15°, 30°),单排修复模型中带线锚钉受到的应力比双排缝合桥模型中锚钉受到应力分别大 5.6% 和 5.8%,且单排模型中两枚锚钉在锚钉的上部产生了严重的应力集中现象,而双排模型中锚钉受力更为均匀,为患者的术后康复提供了良好的力学环境。

本文以冈上肌和带线锚钉的受力情况为研究指标,利用有限元方法研究了单排带线锚钉固定和双排缝合桥固定修复肩袖损伤的力学差异。从结果来看,单排带线锚钉固定模型中,冈上肌和带线锚钉均出现了应力集中现象,且受力均大于双排模型中冈上肌和锚钉的受力,说明在单排 2 枚锚钉的固定方法下肱骨头与肌肉之间为点接触,难以达到完整的覆盖,而双排缝合桥固定则恰好弥补了这些不足,骨与肌肉之间充分的接触使肩袖各部受力均匀,有利于患者恢复,从生物力学角度解释了“双排缝合桥固定优于单排带线锚钉固定”这一观点^[13-15]。

参考文献

- [1] 刘玉杰,李光辉,李众利,等. 异体骨锚钉双排固定法修复肩袖损伤[J]. 中华创伤杂志, 2008, 24(8): 633-635.
LIU YJ, LI GH, LI ZL, et al. Arthroscopic rotator cuff repair with double-row allograft bone suture anchor[J]. Zhonghua Chuang Shang Za Zhi, 2008, 24(8): 633-635. Chinese.
- [2] Inoue A, Chosa E, Goto K, et al. Nonlinear stress analysis of the supraspinatus tendon using three-dimensional finite element analysis[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2013, 21(5): 1151-1157.
- [3] 陈刚,潘界恩,黄成龙,等. 关节镜下双排缝合桥技术治疗中至大型肩袖全层撕裂的早期疗效分析[C]. 浙江省医学会骨科学分会. 2015 年浙江省骨科学学术年会论文汇编—关节专题. 浙江省医学会骨科学分会; 浙江省科学技术协会, 2015: 28-29.
CHEN G, PAN JE, HUANG CL, et al. Arthroscopic double-row suture bridge technique for the treatment of medium to large rotator cuff[C]. Orthopedics Branch of Zhejiang Medical Association. 2015 Zhejiang Orthopedics Academic Annual Conference Papers—Joint Topics. Orthopedics Branch of Zhejiang Medical Association; Zhejiang Science and Technology Association, 2015: 28-29. Chinese.
- [4] 鲁宁, Edward VC. 生物扩增在肩袖损伤修复中的运用[J]. 中国骨伤, 2011, 34(3): 263-265.
LU N, Edward VC. Applications of biologic augmentations in rotator cuff repair[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2011, 24(3): 263-265. Chinese with abstract in English.
- [5] Wu LJ. Nonlinear finite element analysis for musculoskeletal biomechanics of medial and lateral plantar longitudinal arch of Virtual Chinese Human after plantar ligamentous structure failures[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2007, 22(2): 221-229.
- [6] Duprey S, Bruyere K, Verriest JP. Human shoulder response to side impacts: a finite element study[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2007, 10(5): 361-370.
- [7] Cutti AG, Veeger HEJD. Shoulder biomechanics: today's consensus and tomorrow's perspectives[J]. Med Biol Engin Comput, 2009, 47(5): 463-466.
- [8] 章志望. 肩关节 Bankart 损伤的诊治及其生物力学的有限元分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
ZHANG ZW. Diagnosis and treatment of shoulder Arthritis of Bankart and its finite element analysis of biomechanics [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. Chinese.
- [9] 朱鸣镛, 汤锦波, 凌树才, 等. 肩关节运动时肌肉力臂改变的实验研究[J]. 中国临床医学, 2007, 14(2): 221-225.
ZHU MZ, TANG JB, LING SC, et al. The experiential study of the muscles' moment arms changes during the movement of the glenohumeral joint[J]. Zhongguo Lin Chuang Yi Xue, 2007, 14(2): 221-225. Chinese.
- [10] 何仿, 荀三怀, 卜海富. 不同肩关节功能位置上肱骨三维有限元应力分析[J]. 临床骨科杂志, 2006, 9(6): 559-561.
HE F, GOU SH, BU HF. Three dimensional finite element analysis of humerus under the different functional position of shoulder[J]. Lin Chuang Gu Ke Za Zhi, 2006, 9(6): 559-561. Chinese.
- [11] Mihata T, Watanabe C, Fukunishi K, et al. Functional and structural outcomes of single-row versus double-row versus combined double-row and suture-bridge repair for rotator cuff tears[J]. Am J Sports Med, 2011, 39(10): 2091-2098.
- [12] Kim YS, Chung SW, Kim JY, et al. Is early passive motion exercise necessary after arthroscopic rotator cuff repair[J]. Am J Sports Med, 2012, 40(4): 815-821.
- [13] Sano H, Takahashi A, Chiba D, et al. Stress distribution inside bone after suture anchor insertion: Simulation using a three-dimensional finite element method[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2012, 21(8): 1777-1782.
- [14] Park JY, Lhee SH, Oh KS, et al. Clinical and ultrasonographic outcomes of arthroscopic suture bridge repair for massive rotator cuff tear[J]. Arthroscopy, 2013, 29(2): 280-289.
- [15] 周晓波, 梁军波, 陈忠义. 关节镜下 3 种方式修补肩袖损伤的疗效分析[J]. 中国骨伤, 2017, 30(8): 689-694.
ZHOU XB, LIANG JB, CHEN ZY. Comparison of therapeutic effects of three repair methods for rotator cuff tears under arthroscopy[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2017, 30(8): 689-694. Chinese with abstract in English.

(收稿日期: 2020-10-05 本文编辑: 连智华)