

关节镜下不同穿骨技术修复肩袖损伤的有限元分析

季康,俞涵,陈刚,潘界恩,李金

(嘉兴学院附属第二医院骨科,浙江 嘉兴 314000)

【摘要】 目的:应用有限元方法比较并分析关节镜下不同穿骨技术修复肩袖损伤的生物力学差异。方法:根据 1 名健康成年人的肩关节 CT 数据分别建立传统关节镜下穿骨(arthroscopic transosseous, ATO)技术,巨针技术(giant needle technique)及 ArthroTunneler(AT)技术的有限元模型。对 3 种技术模型上的缝合线均分别施加 10 N 及 20 N 载荷,比较并分析 3 种模型骨隧道及缝合线的应力变化。结果:在相同载荷下,传统 ATO 技术模型外侧骨隧道及缝合线所受应力均最大,其次为巨针技术模型;AT 技术模型中段骨隧道及缝合线所受应力均最大,其次为巨针技术模型。在不同载荷下,3 种模型的高应力区均主要集中于缝合线与骨隧道的接触部位。与传统 ATO 技术模型相比,巨针技术及 AT 技术模型外侧骨隧道及缝合线的应力分布均较分散,但 AT 技术模型的中段骨隧道及缝合线均存在明显的应力集中现象。结论:相对于传统 ATO 技术,巨针技术及 AT 技术均可降低缝合线切割骨隧道的风险,可能是较佳的修复方式。但 AT 技术相对于巨针技术,其在骨质疏松患者中的应用可能有限。

【关键词】 肩袖损伤; 关节镜; 穿骨隧道; 有限元分析

中图分类号:R686.1

DOI:10.12200/j.issn.1003-0034.2022.10.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Finite element analysis of arthroscopic repair of rotator cuff injury with different transosseous techniques Ji Kang, YU Han, CHEN Gang, PAN Jie-en, and LI Jin. Department of Orthopaedics, the Second Affiliated Hospital of Jiaxing University, Jiaxing 314000, Zhejiang, China

ABSTRACT Objective: To compare and analyze the biomechanical differences between different transosseous techniques in arthroscopic repairment of rotator cuff injuries by finite element analysis. **Methods:** Finite element models of traditional arthroscopic transosseous (ATO) technique, giant needle technique, and ArthroTunneler (AT) technique were established based on the shoulder CT data of a healthy adult. Then, loads of 10 N and 20 N were applied to the sutures on the different technical models, respectively. Compare and analyze the stress changes of the bone tunnels and sutures of the three models were compared and analyzed. **Results:** Under the same condition of loading, the stress on the lateral bone tunnels and sutures of the traditional ATO technology model was the largest, followed by the giant needle technology model. The stress on the mid-section bone tunnels and sutures of the AT technology model was the largest, followed by the giant needle technology model. Under the different conditions of loading, the high-stress areas of the three models were mainly concentrated on the contact area between the sutures and the bone tunnels. Besides, compared with the traditional ATO technology model, the stress distribution of the lateral bone tunnels and sutures of the giant needle technology and AT technology model were more dispersed, but there was obvious stress concentration phenomena in the stress distribution in the mid-section bone tunnels and sutures in the AT technology model. **Conclusion:** Compared with the traditional ATO technique, both the giant needle technique and the AT technique can reduce the risk of cutout between the bone tunnel and suture, and may be better treatments for rotator cuff tear. However, compared with the giant needle technique, the application of AT technique in patients with osteoporosis may be limited.

KEYWORDS Rotator cuff tear; Arthroscopy; Transosseous; Finite element analysis

肩袖损伤的发生率呈持续增长趋势,其中冈上肌是肩袖损伤最常累及的部位^[1]。对于保守治疗无

效且症状持续存在的患者,目前临床多采用关节镜下修复技术治疗肩袖损伤,如单排锚钉修复、双排锚钉修复及缝线桥式修补等^[2],但其多受制于锚钉的高额费用及其松动、拔脱的风险等^[3-5]。关节镜下穿骨(arthroscopic transosseous, ATO)技术不仅较好地解决上述问题,而且可使肩袖在术后获得较好的血供^[6-7],临床效果可靠^[8-11]。但通过传统 ATO 技术修

基金项目:浙江省医药卫生科技项目(编号:2019PY081)

Fund program: Medical and Health Technology Program of Zhejiang Province (No. 2019PY081)

通讯作者:俞涵 E-mail: yu892149575@163.com

Corresponding author: YU Han E-mail: yu892149575@163.com

复肩袖损伤,不仅术中腋神经损伤的风险较高,术后常存在明显的线-骨界面切割现象及较高的肩袖再撕裂率^[12-13]。近年来不少学者通过对骨隧道的制备技术进行改良,发现制备弧形骨隧道的巨针技术^[14-15]及制备垂直骨隧道的 ArthroTunneler(AT)技术^[16]均可弥补传统 ATO 技术的缺点,并且术后均可获得较好的临床效果。关节镜下不同穿骨修复技术尚缺少生物力学分析,因此本次研究通过有限元分析方法,比较传统 ATO 技术、巨针技术及 AT 技术的三维模型在不同载荷下的生物力学差异。

1 资料与方法

1.1 三维模型建立

选取 1 名既往无肩关节外伤史的健康男性志愿者,42 岁,身高 176 cm,体重 71 kg。对志愿者行右肩关节 CT 平扫,利用 Mimics 19.0 软件读取 Dicom 格式的 CT 资料,并通过阈值分割、区域增长及三维建模等步骤建立肱骨模型。将肱骨模型导入 3-matic 11.0 软件中,并根据该志愿者 CT 扫描数据在软件中建立包括冈上肌、肱骨及软骨在内的右肩模型。运用 Geomagic Studio 2017 软件对右肩模型进行光滑、降噪及拟合曲面等处理,并导出为 STEP 文件。通过 UGNX 10.0 构建直径 0.5 mm 的仿真 2 号缝合线模型,并根据 3 种不同装配方式进一步建立不同的技术模型。

(1)传统 ATO 技术模型。以肱骨大结节和关节软骨交接区及大结节外侧边 15 mm 为骨隧道的定位点,并分别创建 2 个直径 2.5 mm 的斜行骨隧道,同侧骨隧道中心点相距 15 mm^[17-18]。

(2)巨针技术模型。骨隧道的定位点及直径均与传统 ATO 技术相同,参照 Tauber 等^[19]的骨隧道制备方式,分别制备 2 个弧形的骨隧道。

(3)AT 技术模型。骨隧道的定位点及直径均与传统 ATO 技术相同,参照既往研究^[4,20]的骨隧道制备方式,分别制备 2 个垂直的骨隧道。见图 1。

1.2 材料赋予及网格划分

将 3 种技术模型分别导入 ANSYS workbench 19.0 软件中,参照既往研究方法^[21-23],输入模型各部

件属性参数(表 1),且对 3 种技术模型进行网格划分(表 2),缝合线均由六面体单元划分网格,其余组件均由四面体单元划分网格。

表 1 有限元模型的材料参数

Tab.1 Material properties of finite element models

材料	弹性模量(MPa)	泊松比
缝合线	591	0.45
松质骨	2 000	0.26
冈上肌	1 200	0.40
软骨	400	0.40
皮质骨	13 400	0.30

表 2 不同模型各组件划分的单元和节点数

Tab.2 Number of meshed elements and nodes for each component of different models

模型	材料	节点数(个)	单元数(个)
传统 ATO 技术模型	皮质骨	62 572	329 295
	松质骨	12 902	68 181
	软骨	2 722	8 186
	冈上肌	17 364	91 084
	左缝合线	16 859	20 126
	右缝合线	17 964	21 489
巨针技术模型	皮质骨	72 053	394 779
	松质骨	17 824	96 348
	软骨	2 722	8 186
	冈上肌	11 911	62 994
	左缝合线	52 617	58 812
	右缝合线	51 898	59 343
AT 技术模型	皮质骨	82 186	452 956
	松质骨	52 194	284 674
	软骨	2 722	8 186
	冈上肌	17 582	92 979
	左缝合线	37 440	44 764
	右缝合线	38 193	45 859



图 1 关节镜下不同穿骨技术的有限元模型 1a. 传统 ATO 技术模型 1b. 巨针技术模型 1c. AT 技术模型

Fig.1 Finite element models of different transosseous techniques under arthroscopy 1a. Traditional arthroscopic transosseous technique model 1b. Giant needle technique model 1c. ArthroTunneler technique model

1.3 载荷及约束条件设置

参照 Quental 等^[21]的研究,将软骨和冈上肌与骨之间的接触关系均设置为绑定约束;缝合线与骨、缝合线与冈上肌的接触关系均设置为无摩擦的接触约束,并将肱骨远端下表面完全固定。由于缝合线侧滑及肌腱回缩均可导致缝合线的形变,因此,本次研究约束所有缝合线除其纵轴所在平面外的各方向位移均为 0,并为缝合线在其纵轴方向施加 2 种载荷,分别为 10 N 载荷及 20 N 载荷,以期模拟术中其被施加的张力。

1.4 观察项目与方法

本次研究对 3 种模型的缝合线分别施加 2 种载荷,分别为 10 N 及 20 N,分别对 3 种模型构建的有效性进行验证,并通过以下指标分别对不同载荷下各模型骨隧道及缝合线的应力学行为进行分析:(1) 3 种技术模型外侧骨隧道及缝合线的应力分布与最大等效应力。(2) 3 种技术模型中段骨隧道及缝合线的应力分布与最大等效应力。

2 结果

2.1 3 种模型骨隧道与缝合线接触部位反作用力测试结果

3 种模型外侧、中段骨隧道与缝合线接触部位的反作用力大小均大致与施加相应载荷后的力学特点相符(表 3),因此成功构建了 3 种技术的有限元模型,且 3 种模型有可比性。

2.2 3 种模型外侧骨隧道及缝合线的应力学行为

在 2 种载荷下,3 种技术模型外侧骨隧道及缝合线的应力分见图 2-3。各模型外侧骨隧道及缝合线的高应力区均主要集中于骨隧道与缝合线的接触部位。与传统 ATO 技术模型相比,巨针技术及 AT 技术模型外侧骨隧道及缝合线上的应力分布均较分散。各模型外侧骨隧道及缝合线的最大等效应力见表 4。

2.3 3 种模型中段骨隧道及缝合线的应力学行为

在 2 种载荷下(10 N 和 20 N),3 种技术模型中段骨隧道及缝合线的应力分布见图 4-5 所示。传统

表 3 不同载荷下各模型骨隧道与缝合线接触部位的反作用力(N)

Tab.3 Reaction force of the contact part between bone tunnels and sutures of each model under different loading conditions(N)

拉力载荷	模型	外侧骨隧道与缝合线接触部位的反作用力		中段骨隧道与缝合线接触部位的反作用力	
		接触部位 1	接触部位 2	接触部位 3	接触部位 4
10 N	传统 ATO 技术模型	18.0	19.2	0	0
	巨针技术模型	13.8	9.3	15.5	15.7
	AT 技术模型	10.5	10.8	10.3	8.6
20 N	传统 ATO 技术模型	36.2	28.2	0	0
	巨针技术模型	15.4	18.5	31.1	31.3
	AT 技术模型	20.2	20.7	19.5	20.2

注:接触部位 1、3 分别为各模型左缝合线与外侧骨隧道和中段骨隧道的接触部位。接触部位 2、4 分别为各模型右缝合线与外侧骨隧道和中段骨隧道的接触部位

Note: Contact parts 1 and 3 are the contact parts of each model left suture with the lateral bone tunnel and mid-section bone tunnel, respectively. Meanwhile, contact parts 2 and 4 are the contact parts of each model right suture with the lateral and mid-section bone tunnels, respectively

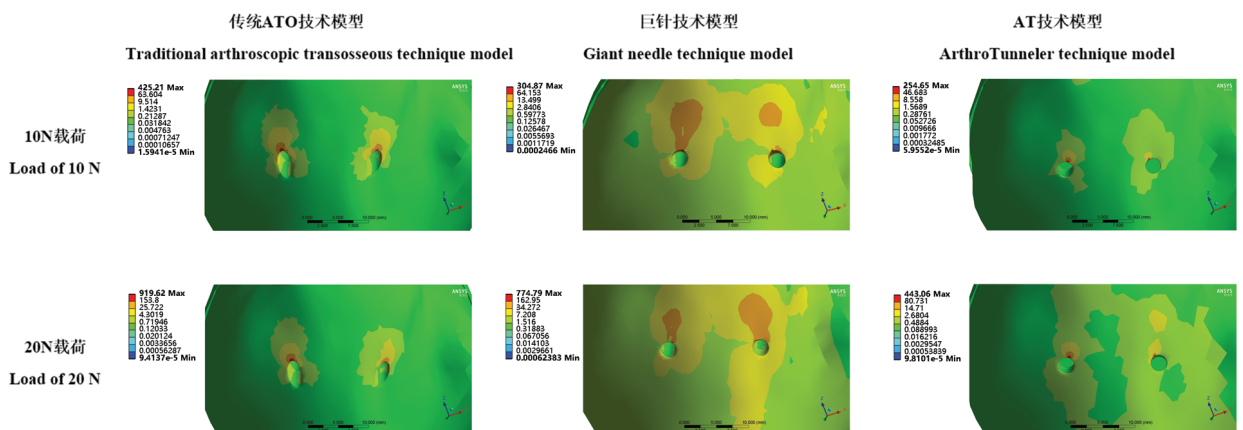


图 2 各模型外侧骨隧道的应力分布

Fig.2 Stress distribution of the lateral bone tunnels of different models

ATO 技术模型骨隧道几乎无应力分布，且其中段缝合线上的应力分布较分散。AT 技术模型相对于巨针技术模型，其中段骨隧道及缝合线存在明显的应力集中现象。各模型中段骨隧道及缝合线的最大等效应力见表 4。

3 讨论

3.1 不同肩袖修复技术的优缺点

开放手术下穿骨修复技术曾是肩袖损伤治疗的金标准^[16]。但该技术创伤大，术后疼痛较明显，且存在明显的线-骨界面切割现象、较高的腋神经及三角

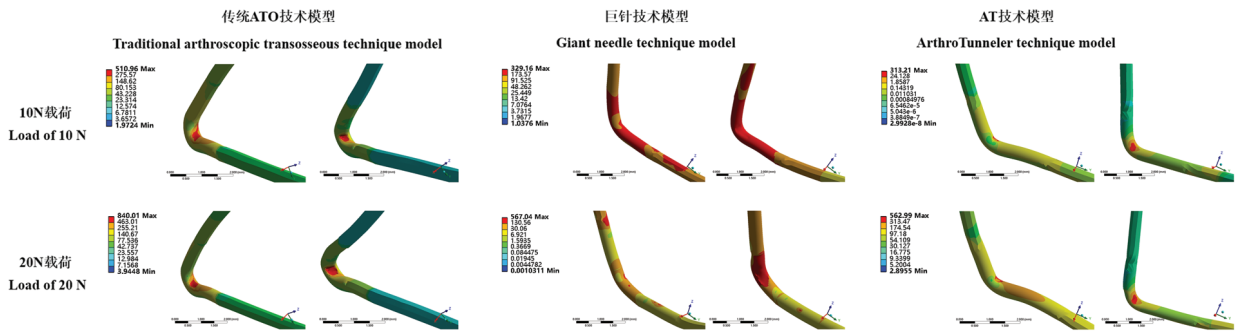


图 3 各模型外侧缝合线的应力分布
Fig.3 Stress distribution of the lateral sutures of different models

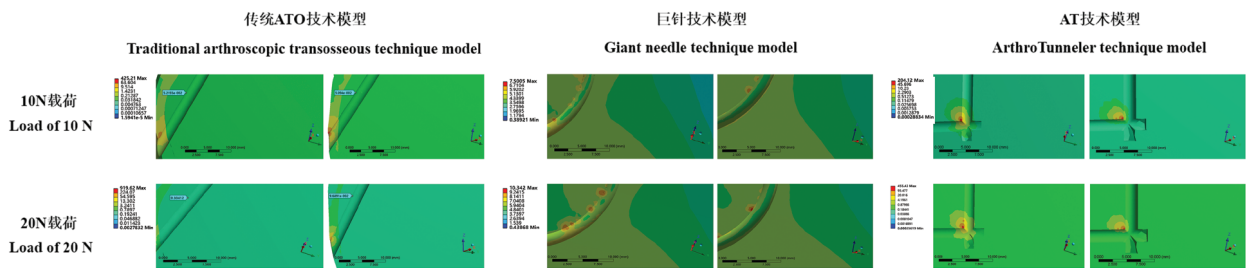


图 4 各模型中段骨隧道的应力分布
Fig.4 Stress distribution of the mid-section bone tunnels of different models

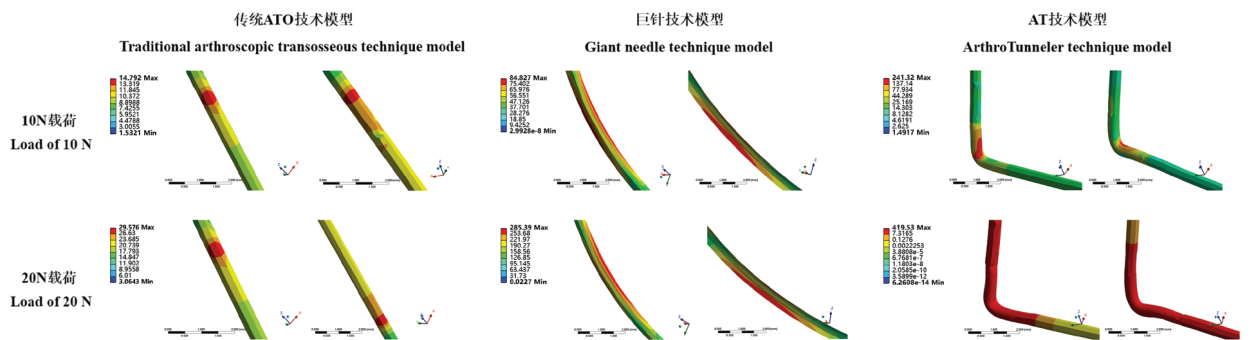


图 5 各模型中段缝合线的应力分布
Fig.5 Stress distribution of the mid-section sutures of different models

表 4 不同载荷下各模型骨隧道及缝合线的最大等效应力 (MPa)

Tab.4 Maximum equivalent stress of bone tunnels and sutures of each model under different conditions of loading (MPa)

模型	不同载荷下外侧骨隧道的最大等效应力		不同载荷下外侧缝合线的最大等效应力		不同载荷下中段骨隧道的最大等效应力		不同载荷下中段缝合线的最大等效应力	
	10 N	20 N	10 N	20 N	10 N	20 N	10 N	20 N
传统 ATO 技术模型	425.2	919.6	511.0	840.0	0.1	0.3	14.8	29.6
巨针技术模型	304.9	744.8	329.2	567.0	7.5	10.3	84.8	285.4
AT 技术模型	254.7	443.1	313.2	563.0	204.1	455.4	241.3	419.5

肌损伤的风险等缺点^[24],目前鲜有报道。关节镜下带线锚钉的肩袖修复技术因其较优异的临床效果及生物力学性能,临床医生多倾向于采用该技术修复肩袖损伤^[1]。但该技术不仅存在较高的内固定耗材费用、较高的锚钉脱出率及较大的锚钉占骨量等弊端^[4,11-12],且术后存在较高的固定物周围骨溶解概率^[12,16,20]及Ⅱ型再撕裂率^[12,20]。而 ATO 技术较好地规避了这些带线锚钉技术的不足,且穿过足印区的骨隧道可能使肩袖获得较好的血供有利于其愈合^[7,25-26]。同时该技术临床效果可靠,引起不少国内外学者的关注^[9-11,25-27]。但传统 ATO 技术仍存在较高的腋神经损伤^[25,28]及缝合线切割骨隧道的风险^[12-13]。巨针技术及 AT 技术不仅集合了传统 ATO 技术的优点,且较好地降低缝合线切割骨隧道及腋神经损伤的风险,减轻术后早期疼痛^[4,29]。但 2 种改良 ATO 技术存在一定的局限性:对术者技术要求较高,学习曲线较长^[26-27];由于肩峰阻挡,术中操作可能受限^[12];存在一定的骨隧道破裂的风险^[4];特殊器材虽可重复使用,但对其的依赖性较大^[29]。同时,将改良 ATO 技术作为常规技术前,仍需较多的研究^[30]。不同技术有各自的优缺点,最佳肩袖修补技术仍是研究热点。

3.2 各模型的骨隧道及缝合线生物力学分析及临床意义

可能由于 2 种改良 ATO 技术模型相对于传统 ATO 技术模型,其外侧骨隧道与肱骨纵轴成角较大,本次研究发现在 2 种载荷下,2 种改良 ATO 技术模型外侧骨隧道及缝合线的应力分布均较分散,最大等效应力均较小。因此,与传统 ATO 技术相比,巨针技术及 AT 技术均可较好地降低缝合线切割骨隧道的风险,并且从生物力学角度解释了“改良 ATO 技术相对于传统 ATO 技术具有较好的临床效果”这一观点^[15,27]。Salata 等^[18]通过肩关节标本研究了巨针技术及 AT 技术的失效模式,发现相对于 AT 技术,巨针技术以“缝合线失效”为主。而本次研究发现 AT 技术模型的外侧骨隧道及缝合线受力均比巨针技术模型的外侧骨隧道及缝合线受力小,这可能较好的解释了 Salata 等^[18]的研究结果。同时本次研究发现 3 种技术的研究结果有一定相似性,即 3 种技术模型外侧骨隧道及缝合线的高应力区均主要集中于缝合线与骨隧道的接触部位,临床医生于骨隧道口处适当增大缝合线与骨隧道的接触面积,可能带来较好生物力学表现。此外,在中段骨隧道及缝合线的应力分布上,AT 技术模型在 2 种载荷下均存在最显著的应力集中,其高应力区均主要集中于缝合线与骨隧道的接触部位。Salata 等^[18]发现 AT 技术以“骨失效”为主,一方面可能由于其研究中 AT 组标本的平

均年龄较大;另一方面 AT 组标本的生物力学表现可能与本次研究结果有关,即 AT 技术模型中段骨隧道的应力集中可能引起骨隧道的塌陷,形成与传统 ATO 技术相似的斜行骨隧道。因此,AT 技术在骨质疏松患者中的临床效果可能有限^[30]。

3.3 研究的可行性及模型构建的有效性

改良 ATO 技术基于不同缝合方式及骨隧道制备器械的命名较多,但骨隧道均表现为弧形或垂直骨隧道,且既往研究多围绕足印区覆盖面积、失效强度及临床效果等展开^[4,20-21],忽视不同技术对骨隧道及缝合线本身的生物力学影响,因此本次研究利用有限元分析比较不同技术的生物力学差异。临床上常将外侧骨隧道中心点放置于骨量良好的区域,且其与腋神经存在一定安全距离,不少研究发现大结节外侧 15 mm 处为 ATO 技术外侧骨隧道较好的定位区域^[4,20,28]。缝合强度与缝合线材质、缝合线的数量及术中褥式缝合的数量有关^[1,20],本次研究主要关注不同骨隧道类型对生物力学的影响,为简化分析并使 3 种技术具有可比性,3 种技术模型均采用单根缝合线简单缝合的方式,且 3 种模型骨隧道的中心点位置均一致。此外,本研究有限元模型的材料赋值参数、边界条件及载荷的施加方式等均参照既往研究方法^[21-23],且通过测试 3 种模型接触部位的反作用力对其施加载荷的有效性进行验证(表 3),证明成功构建 3 种技术的有限元模型,且 3 种技术模型有可比性,为未来研究最佳肩袖修补技术提供 1 种可重复性的方法。

3.4 研究的局限性

本研究存在以下不足:(1)本研究采用有限元分析方法,不可避免地对象进行简化。(2)本研究虽对模型有效性进行验证,但缝合线直径较小,且与骨隧道的接触面积较少,应力较集中,存在一定偏倚。(3)本研究只进行静态有限元分析,未考虑缝合线的侧向滑动及肌腱回缩对模型的影响。

综上所述,巨针技术及 AT 技术可在一定程度上降低缝合线切割骨隧道的风险,可能是较佳的修复方式。相对于巨针技术,AT 技术在骨质疏松患者中的应用可能有限。

参考文献

- [1] Shi BY, Diaz M, Binkley M, et al. Biomechanical strength of rotator cuff repairs: a systematic review and meta-regression analysis of cadaveric studies[J]. *Am J Sports Med*, 2019, 47(8):1984-1993.
- [2] Kim HM, Hsu JE, Ricchetti ET. What's new in shoulder and elbow surgery[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2021, 103(20):1865-1871.
- [3] 张广瑞,刘嘉鑫,周建平,等. 关节镜下肩袖损伤缝合技术研究进展[J]. *中国骨伤*, 2021, 34(2):160-164.
ZHANG GR, LIU JX, ZHOU JP, et al. Suture technique for rotator cuff tears' repair under arthroscopic[J]. *Zhongguo Gu Shang/Chi-*

- na J Orthop Trauma, 2021, 34(2):160-164. Chinese with abstract in English.
- [4] Randelli P, Stoppani CA, Zaolino C, et al. Advantages of arthroscopic rotator cuff repair with a transosseous suture technique: a prospective randomized controlled trial[J]. Am J Sports Med, 2017, 45(9): 2000-2009.
- [5] Kuroda S, Ishige N, Mikasa M. Advantages of arthroscopic transosseous suture repair of the rotator cuff without the use of anchors[J]. Clin Orthop Relat Res, 2013, 471(11): 3514-3522.
- [6] Bronsnick D, Pastor A, Peresada D, et al. Is arthroscopic transosseous rotator cuff repair strength dependent on the tunnel angle[J]. Orthop J Sports Med, 2019, 7(6): 2325967119848667.
- [7] Urita A, Funakoshi T, Horie T, et al. Difference in vascular patterns between transosseous-equivalent and transosseous rotator cuff repair[J]. J Shoulder Elbow Surg, 2017, 26(1): 149-156.
- [8] Plachel F, Traweger A, Vasvary I, et al. Long-term results after arthroscopic transosseous rotator cuff repair[J]. J Shoulder Elbow Surg, 2019, 28(4): 706-714.
- [9] Firat A, Aydin M, Tecimel O, et al. Comparison of the clinical and radiological outcomes of arthroscopic transosseous and transosseous-equivalent double-row rotator cuff repair techniques[J]. Acta Orthop Traumatol Turc, 2020, 54(2): 178-185.
- [10] Ryu RKN. Arthroscopic transosseous suture repair and single-row anchor fixation for rotator cuff lesions did not differ for pain, function, or rotator-cuff integrity at 15 months[J]. J Bone Joint Surg Am, 2017, 99(22): 1943.
- [11] 马佳, 张磊, 刘晓华, 等. 关节镜下穿骨缝线方式治疗肩袖损伤的早期临床疗效[J]. 中华外科杂志, 2018, 56(12): 935-937. MA J, ZHANG L, LIU XH, et al. Early clinical efficacy of arthroscopic transosseous suture repair in the treatment of rotator cuff injury[J]. Zhonghua Wai Ke Za Zhi, 2018, 56(12): 935-937. Chinese.
- [12] Chillemi C, Mantovani M, Osimani M, et al. Arthroscopic transosseous rotator cuff repair: the eight-shape technique[J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2017, 27(3): 399-404.
- [13] Sandow MJ, Schutz CR. Arthroscopic rotator cuff repair using a transosseous knotless anchor (ATOK)[J]. J Shoulder Elbow Surg, 2020, 29(3): 527-533.
- [14] Fleega BA. Arthroscopic transhumeral rotator cuff repair: giant needle technique[J]. Arthroscopy, 2002, 18(2): 218-223.
- [15] Atoun E, Horneff JG, Levy O, et al. Needle-based arthroscopic transosseous rotator cuff repair: a short-term outcomes analysis[J]. Cureus, 2021, 13(2): e13595.
- [16] Liu XN, Yang CJ, Lee GW, et al. Functional and radiographic outcomes after arthroscopic transosseous suture repair of medium sized rotator cuff tears[J]. Arthroscopy, 2018, 34(1): 50-57.
- [17] Garofalo R, Castagna A, Borroni M, et al. Arthroscopic transosseous (anchorless) rotator cuff repair[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2012, 20(6): 1031-1035.
- [18] Salata MJ, Sherman SL, Lin EC, et al. Biomechanical evaluation of transosseous rotator cuff repair: do anchors really matter[J]. Am J Sports Med, 2013, 41(2): 283-290.
- [19] Tauber M, Koller H, Resch H. Transosseous arthroscopic repair of partial articular-surface supraspinatus tendon tears[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2008, 16(6): 608-613.
- [20] Kilcoyne KG, Guillaume SG, Hannan CV, et al. Anchored transosseous-equivalent versus anchorless transosseous rotator cuff repair: a biomechanical analysis in a cadaveric model[J]. Am J Sports Med, 2017, 45(10): 2364-2371.
- [21] Quental C, Reis J, Folgado J, et al. Comparison of 3 supraspinatus tendon repair techniques—a 3D computational finite element analysis[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2020, 23(16): 1387-1394.
- [22] 刘来有, 吕智. 单排和双排肩袖缝合桥力学研究[J]. 中国骨伤, 2021, 34(6): 544-549. LIU LY, LYU Z. Study on the mechanical differences between single-row belt rivets and double-row suture bridge in repairing rotator cuff injury[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2021, 34(6): 544-549. Chinese with abstract in English.
- [23] 许苑晶, 杨泽政, 刘至原, 等. 肩袖的有限元建模及其生物力学分析[J]. 中华创伤骨科杂志, 2017, 19(4): 279-285. XU YJ, YANG ZZ, LIU ZY, et al. Biomechanical analysis of a finite element model of rotator cuff[J]. Zhonghua Chuang Shang Gu Ke Za Zhi, 2017, 19(4): 279-285. Chinese.
- [24] Dey Hazra RO, Ernat JJ, Rakowski DR, et al. The evolution of arthroscopic rotator cuff repair[J]. Orthop J Sports Med, 2021, 9(12): 23259671211050899.
- [25] Blas-Dobón JA, Aguilera L, Montaner-Alonso D, et al. Arthroscopic transosseous rotator cuff repair: how to avoid damaging the axillary nerve—a cadaveric study[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2020, 140(11): 1767-1774.
- [26] Steinitz A, Buxbaumer P, Hackl M, et al. Arthroscopic transosseous anchorless rotator cuff repair using the X-Box technique[J]. Arthrosc Tech, 2019, 8(2): e175-e181.
- [27] Srikumaran U, Huish EG Jr, Shi BY, et al. Anchorless arthroscopic transosseous and anchored arthroscopic transosseous equivalent rotator cuff repair show no differences in structural integrity or patient-reported outcomes in a matched cohort[J]. Clin Orthop Relat Res, 2020, 478(6): 1295-1303.
- [28] Gupta H, Mishra P, Kataria H, et al. Optimal angle of the bone tunnel for avoiding axillary nerve injuries during arthroscopic transosseous rotator cuff repair: a magnetic resonance imaging-based simulation study[J]. Orthop J Sports Med, 2018, 6(11): 2325967118806295.
- [29] Sanders B. True transosseous hybrid rotator cuff repair[J]. Arthrosc Tech, 2019, 8(9): e1013-e1018.
- [30] Atoun E, Kane LT, Abboud JA. Arthroscopic, needle-based, transosseous rotator cuff repair[J]. Arthrosc Tech, 2020, 9(1): e57-e63.

(收稿日期: 2022-06-12 本文编辑: 连智华)