

肩袖修补的生物力学研究进展

傅夏威¹, 汪滋民^{1,2}

(1. 海军军医大学第一附属医院 关节骨病外科, 上海 200433; 2. 上海交通大学医学院附属第九人民医院 骨科, 上海 200001)

摘要: 肩袖是维持肩关节运动与动态稳定的重要结构。肩袖损伤改变了其独特的生物力学作用, 导致肩关节疼痛及活动障碍。尽管缝合技术与固定方法不断改进, 术后再撕裂率仍然很高。理解正常肩袖的生物力学机制以及恢复损伤后肩袖的特殊生物力学作用, 是预防再撕裂的关键。本文对近年来肩袖损伤修补的生物力学相关研究进行综述, 以为临床手术开展提供一定的理论指导。

关键词: 肩袖损伤; 再撕裂; 生物力学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.02.028

Progress in Biomechanical Study of Rotator Cuff Repair

FU Xiawei¹, WANG Zimin^{1,2}

(1. Department of Orthopaedic Surgery, the First Affiliated Hospital of Navy Military Medical University, Shanghai 200433, China; 2. Department of Orthopaedic Surgery, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

Abstract: The rotator cuff is an important structure to maintain movement and dynamic stability of the shoulder joint. Rotator cuff injury changes its unique biomechanical effects, resulting in shoulder pain and mobility disorders. Although great progress has been made in suture technology and fixation method, the rate of postoperative retear is still very high. Understanding the biomechanical mechanism of normal rotator cuff and restoring the special biomechanical effect of rotator cuff after injury are the key to prevent postoperative retear. This article reviewed biomechanical researches on rotator cuff repair in recent years, in order to provide some theoretical guidance for clinical operation.

Key words: rotator cuff injury; retear; biomechanics

肩袖损伤是导致肩关节疼痛及活动受限的主要病因之一, 在人群中发病率约为 20%, 且与年龄具有显著的相关性^[1]。肩袖肌肉收缩为关节运动提供动力, 同时维持肩关节的动态稳定。肩袖撕裂导致力偶作用失调, 肱骨头移位, 进一步加重原有损伤和产生相应临床症状。关节镜下肩袖修补是目前主要的治疗方法, 尽管缝合技术及固定方式取得了巨大进展, 术后再撕裂率仍高达 11%~57%^[1]。理解正常肩袖的生物力学作用, 达到无张力的解剖

学修复, 是预防再撕裂的关键。

1 肩袖的正常生物力学作用及损伤机制

肩袖是由 4 组肌腱包绕肱骨头形成的袖套状结构, 肌肉-肌腱收缩时产生的旋转扭矩带动肩关节活动。冈上肌主要起外展作用, 冈下肌及小圆肌负责外旋运动, 肩胛下肌则是主要的内旋肌。肩袖的另一重要作用是维持肩关节稳定。在运动末期, 关节囊及关节周围韧带等静态结构拉伸绷直, 从而限

制肱骨头运动;但在运动中期,这些静态稳定结构松弛,肩袖收缩产生的“穴-压效应”成为维持稳定的主要动态机制。“穴-压效应”一方面依赖于盂唇加深了50%的关节窝深度,另一方面则依赖于肩袖肌肉收缩产生的压缩负荷。较深的关节窝及较高的压缩负荷可以将肱骨头稳定在关节孟上,同时降低关节运动时的剪切力及半脱位的风险^[2]。此外,肩袖收缩产生的力偶平衡是维持关节稳定的另一重要机制。当两个相对的肌肉群合力共同作用于某一支点时,就会发生力偶作用。肩袖的力偶平衡主要包括两个方面:①在冠状面,位于肩关节旋转中心下方的肩袖肌肉,包括肩胛下肌的下部、冈下肌的下部和小圆肌的全部,所产生的力矩与三角肌产生的力矩相平衡,抵抗三角肌收缩产生的向上的牵引力,维持肩关节在外展过程中的稳定;②在轴位平面,前方的肩胛下肌与后方的冈下肌及小圆肌力矩相平衡,使肩关节能在活动范围内的任意空间位置保持稳定^[3]。

肩袖撕裂后,损伤肩袖及周围结构将发生一系列生物力学变化,最终引起肩关节运动改变。在损伤早期,肌腱发生应力卸载及回缩,肌纤维变短并发生局部纤维化。随着负荷变化及撕裂进展,细胞外基质重塑,纤维化进一步扩大,肌肉刚度增加。由于总横截面积减少及刚度增加,残存肌腱需承受更高的轴向载荷及剪切力,造成撕裂加重^[4]。Yang等^[5]研究发现,冈上肌前侧部分撕裂达到60%肌腱厚度时,其后侧肌腱应力增加23.8%;Perry等^[6]建立大鼠冈上肌全层撕裂模型,发现冈下肌及肩胛下肌肌腱横截面积增加,弹性模量降低,损伤肌腱纤维数量随着时间推移而增多,说明慢性撕裂还会导致其他肩袖病变。随着撕裂扩大,肩袖正常的力偶作用及“穴-压效应”被破坏,肱骨头发生移位,这是肩袖损伤最重要的生物力学后果。多项研究证实,冈上肌损伤后,肱骨头向上移位显著增加,肩峰-肱骨间隙变窄,残余的肌腱挤压在肱骨头与喙肩弓之间,进一步加重撞击与损伤,甚至导致肩峰下表面“髌白化”^[7]。

2 肩袖修补的生物力学研究

肩袖修补须考虑损伤肌肉结构及刚度变化,特别是巨大肩袖损伤(massive rotator cuff tears,

MRCT)。早期或较小的肩袖损伤,负荷的重新加载可以逆转损伤后生物力学变化,达到较好的愈合效果^[7];慢性或者较大的肩袖损伤,对僵硬、退化的肌肉重新载荷可能会加快肌肉丢失速度,导致更大的伤害;单纯对肌腱的修复也不足以改善慢性撕裂中的退行性环境,进一步提高了术后再撕裂的风险。另外,腱骨结合部位的梯度结构在愈合过程中被疤痕组织取代,力学性能及结构强度减弱,容易导致再撕裂的发生^[8]。因此,实现有效修复的关键是提高愈合的生物力学条件。理想的肩袖修复应该满足以下几个条件:修复足印区、对足印区上肌腱施加适当压力及张力、减少腱骨结合部位的运动至持久愈合完成^[9]。目前,包括单排修补、双排修补、缝线桥技术、经骨修补在内的多种手术方法及缝合技术被开发应用于肩袖修复。

2.1 单排修补

根据缝合方式的不同,单排修补可分为简单缝合、水平褥式缝合、改良的Mason-Allen缝合、止裂缝合与巨大肩袖缝合等。除简单缝合外,其余缝合方法均包含水平褥式缝合,在复位肌腱受到轴向负荷时起到止裂器的作用。多项研究证实,在单排修补中,改良的Mason-Allen缝合及巨大肩袖缝合明显优于其他修补方式,在失效载荷、循环延长、峰值位移及刚度改善上效果更好^[10]。三线锚钉的应用增强了单排修补的生物力学强度。使用三线锚钉进行简单修补在极限载荷和循环延长上与双排缝线桥及止裂缝合无明显差异^[11]。Early等^[12]报道了一种新的跨距增强技术,在单排锚钉修补的基础上,利用两根缝线穿过腱-肌连接处外侧3~4 mm并用外排锚钉交叉固定。与单排修补相比,跨距增强技术减少了后侧间隙的形成,降低了肩袖修复的失败率,为MRCT无法应用双排修补的患者提供了新的治疗策略。

2.2 双排修补

与单排修补相比,双排及缝线桥修补具有更高的初始固定强度、更大的覆盖面积及接触压力、更少的间隙形成与更高的失效载荷^[13]。标准双排修补应力集中于内排锚钉区域,为外侧足印区起到应力屏蔽的作用,从而促进腱骨愈合^[14]。缝线桥技术利用外排锚钉固定内排锚钉的缝线末端,同时将内外排锚钉相连。这种结构设置最大限度地增加了

受压接触面积,减少了肌腱绞窄;内外排相连使关节旋转时载荷分布更加均匀,并可防止关节液进入足印区^[9]。这些优势使关节镜下双排缝线桥修补成为肩袖损伤治疗的首选术式^[15]。

尽管双排缝线桥技术提供了更好的生物力学条件,再撕裂率仍高达 10%~33%^[15]。内排锚钉缝合张力过大导致缝合失效是再撕裂的最常见模式^[13]。Gerhardt 等^[16]发现,桥接缝线的放置显著减少了修复肌腱的血流量,这可能是导致内排修补失效的另一个原因。然而,内排缝合是否打结目前仍有争议。有研究报道了无结缝线桥显示出更好的自我强化效果,同时不会减少足印区接触面积^[17];其他研究则支持与无结缝线桥相比,内排打结在极限载荷、刚度、间隙形成和接触面积等力学因素上都有显著改善^[18]。锚钉缝合及桥接张力导致的肌腱绞窄与肌腱质量之间的平衡是术后愈合的关键。另外,一些研究对双排缝线桥技术进行改良探索。Montanez 等^[19]报道了内排垂直褥式缝合较水平褥式缝合具有更高的失效载荷[(568.9±140.3) N vs (451.1±174.3) N];Virk 等^[20]提出内排缝合放置在腱-肌连接处的循环负荷失败率显著高于放置在其外侧 10 mm(平均循环次数 77 次 vs 100 次);Wieser 等^[21]则发现,缝线从肩袖索的内侧穿过的失败载荷均高于从肩袖索外侧,肩袖索中间和腱-肌连接处的内侧穿过,建议手术中缝线均从肩袖索内侧穿过。Park 等^[22]研究表明,随着桥接张力的增加,足印区接触面积、平均压力和峰值压力也相应增加,张力达到 90 N 后则无法继续增加接触面积,故该研究建议将桥接张力控制在 90 N 以下。

2.3 经骨修补

利用缝线经骨隧道固定肌腱是开放手术的标准术式,随着关节镜技术的发展,镜下经骨修补成为可能。这种技术减少了锚钉数量或无须应用锚钉,理论上减少了腱骨界面的遮挡物,有利于肩袖愈合。生物力学分析表明,单双排修补后应力高度集中于锚钉固定区域,使锚固区成为失效最常见的部位;而经骨修补应力附着点从骨隧道一直延伸到肌腱附着区,肌腱内部未见明显应力集中^[23]。Tashjian 等^[24]对比外排经锚钉固定与经骨隧道固定,发现两者在间隙形成、刚度及失效载荷上无明显差异;Kilcoyne 等^[25]研究发现,双排缝线桥修补

较经 L 型骨隧道修补失效载荷更高,但经 L 型骨隧道修补的再撕裂模式主要为 1 型撕裂,足印区无肌腱残留;而双排缝线桥修补主要为内排锚钉附近的 2 型撕裂,大结节上仍有残余肌腱,为翻修手术带来困难。

3 MRCT 治疗的生物力学研究

MRCT 患者撕裂肌腱发生萎缩、纤维化及脂肪浸润,组织顺应性降低,导致肌肉僵硬及边缘回缩。对于 6~7 cm 撕裂,剩余肩袖应力负荷增加 50%;而 8 cm 撕裂,应力负荷将增加 80%,导致撕裂加重或术后再撕裂^[26]。在轴位平面,三角肌的力矩不再被前后力偶所平衡,肱骨头向上半脱位,肩峰下间隙消失;在冠状面,由于肩袖索被破坏,拮抗肌肌力不足以维持平衡,导致关节运动改变,最终发生假性麻痹。桥接修补、上关节囊重建(superior capsular reconstruction, SCR)、肩袖索重建及肌腱转位是治疗不可修复 MRCT 的常用方法。

3.1 桥接修补

桥接修补利用各种补片材料桥接回缩的肩袖与足印区,实现了解剖重建与动力重建。Lin 等^[27]报道了桥接修补在外旋功能及临床评分改善上优于 SCR,且两者再撕裂率无显著差别。Lenart 等^[28]则发现,桥接修补再撕裂率高达 62%~91%。除冈上肌缺损外,MRCT 常伴有上关节囊缺损,单纯的桥接补片下压肱骨头的强度不足,导致移植物磨损,易造成再撕裂;补片与肩袖缝合界面的疤痕愈合在应力传导中抗牵拉能力弱,导致远期再撕裂。因此,桥接修补的临床结果目前仍有争议,更推荐年轻及残余肌腱质量较好的患者应用该修补方法。补片类型也是影响再撕裂的重要因素;自体或异体组织移植物在失效载荷及刚度上与天然肩袖相似;人工合成移植物在刚度上低于正常肩袖;细胞外基质型移植物失效载荷及刚度均低于组织移植物^[29]。

3.2 上关节囊重建

与桥接补片相比,SCR 最大的区别在于恢复了上囊起始处的内侧锚定,重现了对上肩盂的栓系作用,能更好抑制肱骨头近端移位,降低肩峰下接触压力,并为盂肱关节运动提供支点。Mihata 等^[30]最早提出 SCR 并进行详细的生物力学研究,发现 8 mm 厚度的自体阔筋膜修补优于 4 mm 厚度的阔

筋膜。在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 外展位长度固定阔筋膜,同时行肩峰成形术及将剩余组织与移植物侧边缝合可有效降低肩峰下压力,促进界面愈合及关节稳定^[31];另外,3 mm 同种异体真皮厚度不足以提供足够的间隔效应,在限制肱骨头移位上弱于阔筋膜^[32]。Curtis 等^[33]在皮片修补基础上,于肩峰下表面移植真皮以增加移植物厚度,虽然肱骨头上移减少,但肩峰下压力增加,其临床结果仍需进一步验证。肱二头肌长头腱是维持关节运动与稳定的动态结构,利用二头肌长头腱转位进行 SCR 有天然的解剖优势,同时避免了移植物反应,在 SCR 中的应用逐渐增多。

3.3 肩袖索重建

肩袖索在力学传导、维持力偶平衡及过顶运动中发挥重要作用,肩袖索完好的肩袖损伤患者仍能保留肩关节功能。重建肩袖索,特别是前索重建已被证明可增加关节稳定性及更好地恢复运动,是 MRCT 治疗的重点^[34]。Denard 等^[35]利用同种异体半腱肌 V 型重建肩袖索,发现可显著减少肱骨头移位,肩峰下压力峰值恢复正常,同时对关节运动没有影响;Park 等^[34]利用半腱肌肌腱进行前索重建,并将后方关节囊与移植物侧侧缝合,以恢复关节囊的静态稳定功能;在前索锚定区域利用缝线环形固定,而非穿肌腱固定,有助于恢复肩关节的外展及旋转功能;Venn 等^[36]报道了利用自体二头肌长头腱解剖重建肩袖索的技术:利用锚钉由后向前将编织肌腱固定在大结节后侧与小结节上部,再将肩袖断端与长头腱缝合。但这种技术会导致移植物与肩袖组织张力过高,且肩袖未固定在足印区,在重度脂肪浸润及严重回缩中应用受限。

3.4 肩周肌肌腱转位

对于无关节炎的年轻患者,肌腱转位可模拟正常肩袖的力学功能并恢复力偶作用,是治疗 MRCT 的优选术式。背阔肌转位(latissimus dorsi transfer, LDT)治疗后上 MRCT 已十分成熟,可模拟冈下肌及小圆肌功能,显著改善关节外旋与外展,稳定肱骨头并缓解疼痛^[37]。最近一些研究发现,下斜方肌转位(lower trapezius transfer, LTT)在治疗后上 MRCT 上较 LDT 更具优势。LTT 可更好模拟冈下肌的力线,提供更大的外展力矩,在恢复关节运动与关节反作用力方面优于 LDT^[38]。但下斜方肌的天然附

着点与肱骨头相距较远,应用 LTT 时往往需行肌腱桥接移植。对于前方不可修复的肩胛下肌损伤,前囊重建可恢复前下稳定性,但会导致关节总活动度降低^[39]。胸大肌转位是最常用的术式,虽然其可缓解疼痛,但在功能改善上较为有限,尤其在内旋动力方面^[40]。与胸大肌转位相比,LDT 从胸壁后方转位至肩胛下肌附着区域,显示出与正常肌腱相似的内旋力矩,在改善主动前屈、外展及临床结果方面均优于前者^[40]。

4 组织工程应用的生物力学研究

肩袖修补术后再撕裂率高,愈合组织力学性能差等特点促进了支架材料在肩袖修补中的应用,以提供足够的机械支持,主要包括生物支架与合成支架两大类。由于骨与肌腱力学性能相差悬殊,目前仍未开发出可良好复制腱骨界面的支架材料。生物支架模拟细胞外基质成分,具有天然的组织相容性及生物降解性,适当的孔隙率允许细胞-材料相互作用,促进组织再生。但其机械强度较低,较高的免疫原性及病原体传播等缺点促进了人工合成材料的开发。合成支架可分为可降解支架与不可降解支架。可降解支架包括聚乳酸(PLA)、聚乙醇酸(PGA)和聚乳酸-羟基乙酸(PLGA)共聚物等,其主要优点是能够设计出与愈合界面再生速度相匹配的降解性,为腱骨界面提供机械强度而不影响愈合。在 MRCT 或肩袖组织无法再生时,不可降解支架则可提供持久的机械强度及较小的炎症反应,主要包括聚氨酯、聚四氟乙烯(PTFE)、聚酯等材料。合成支架具有可调节的机械性能和降解性能,有利于肩袖再生,但其成分与骨组织不同,再生骨的能力有限。骨诱导无机材料在组成上与骨相似,能够使骨祖细胞迁移到材料微孔中以协助羟基磷灰石(HA)和新骨组织的形成,磷酸钙生物材料是无机骨诱导材料的主要种类。但骨诱导无机材料通常存在脆性高、断裂强度及机械强度低等缺点。

各类支架材料固有的优缺点促进了组织工程学的发展。在制作工艺上,曹晓艳等^[41]利用定向拉伸工艺提高可吸收补片的机械强度,从而促进肩袖愈合;纳米材料是目前研究的热点,最常用的纳米纺织技术是静电纺丝。电纺纳米纤维可提供足够强度和机械特性以支持组织再生,其柔韧性使其可

按需要的各种方向排列。此外,可调节的基质孔径和孔隙率也可通过促进细胞穿透和组织内长而在组织再生中发挥关键作用。电纺纳米纤维另一个重要特征是能够通过电纺技术将各种材料结合在一起,以达到互相弥补各自的缺点的目的^[42]。组织工程发展的另一个方向是杂合材料的研发。将干细胞、生长因子与支架材料相结合,模拟腱骨结合部位梯度结构及细胞外基质环境形成的3D支架,已被证实可有效提高愈合结构力学性能,降低术后再撕裂率^[43]。

5 总结

肩袖修补的目标是创造利于长久腱骨愈合的生物力学条件。无论采用何种修补方式,再撕裂率仍然很高。随着缝合技术及固定材料的不断改进,失败多发生于缝合-肌腱界面,肌腱在形成稳定愈合前被拔出,肌腱本身的质量和根据撕裂模式将肌腱复原至足印区可能比缝合方式更为重要。对于不可修复的巨大肩袖损伤,桥接修补、上关节囊重建、肩袖索重建与肩周肌肌腱转位是挽救性手术方式,关键是重现损伤肩袖的力偶机制与动力作用,维持盂肱关节稳定。生物材料在肩袖修补中产生的积极力学效应已被大量研究证实,开发与腱骨界面力学特性相匹配且可创造局部促再生的细胞外环境的支架材料是未来研究的重点。

参考文献:

- [1] LONGO UG, CARNEVALE A, PIERGENTILI I, *et al.* Retear rates after rotator cuff surgery: A systematic review and meta-analysis [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 749.
- [2] LUGO R, KUNG P, MA CB. Shoulder biomechanics [J]. *Eur J Radiol*, 2008, 68(1): 16-24.
- [3] GOETTI P, DENARD PJ, COLLIN P, *et al.* Shoulder biomechanics in normal and selected pathological conditions [J]. *EFORT Open Rev*, 2020, 5(8): 508-518.
- [4] GIBBONS MC, SINGH A, ENGLER AJ, *et al.* The role of mechanobiology in progression of rotator cuff muscle atrophy and degeneration [J]. *J Orthop Res*, 2018, 36(2): 546-556.
- [5] YANG S, PARK HS, FLORES S, *et al.* Biomechanical analysis of bursal-sided partial thickness rotator cuff tears [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2009, 18(3): 379-385.
- [6] PERRY SM, GETZ CL, SOSLOWSKY LJ. After rotator cuff tears, the remaining (intact) tendons are mechanically altered [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2009, 18(1): 52-57.
- [7] MUENCH LN, BERTHOLD DP, OTTO A, *et al.* Increased glenohumeral joint loads due to a supraspinatus tear can be reversed with rotator cuff repair: A biomechanical investigation [J]. *Arthroscopy*, 2022, 38(5): 1422-1432.
- [8] ATESOK K, FU FH, WOLF MR, *et al.* Augmentation of tendon-to-bone healing [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2014, 96(6): 513-521.
- [9] ROSSI LA, RODEO SA, CHAHLA J, *et al.* Current concepts in rotator cuff repair techniques: Biomechanical, functional, and structural outcomes [J]. *Orthop J Sports Med*, 2019, 7(9): 2325967119868674.
- [10] WLK MV, ABDELKAFY A, HEXEL M, *et al.* Biomechanical evaluation of suture-tendon interface and tissue holding of three suture configurations in torn and degenerated versus intact human rotator cuffs [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2015, 23(2): 386-392.
- [11] NOYES MP, LEDERMAN E, ADAMS CR, *et al.* Triple-loaded suture anchors versus a knotless rip stop construct in a single-row rotator cuff repair model [J]. *Arthroscopy*, 2018, 34(5): 1414-1420.
- [12] EARLY NA, ELIAS JJ, LIPPITT SB, *et al.* Suture spanning augmentation of single-row rotator cuff repair: A biomechanical analysis [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2017, 26(2): 337-342.
- [13] HACKL M, NACOV J, KAMMERLOHR S, *et al.* Intratendinous strain variations of the supraspinatus tendon depending on repair technique: A biomechanical analysis regarding the cause of medial cuff failure [J]. *Am J Sports Med*, 2021, 49(7): 1847-1853.
- [14] COLE BJ, ELATTRACHE NS, ANBARI A. Arthroscopic rotator cuff repairs: An anatomic and biomechanical rationale for different suture-anchor repair configurations [J]. *Arthroscopy*, 2007, 23(6): 662-669.
- [15] URCH E, LIN CC, ITAMI Y, *et al.* Improved rotator cuff footprint contact characteristics with an augmented repair construct using lateral edge fixation [J]. *Am J Sports Med*, 2020, 48(2): 444-449.
- [16] GERHARDT C, HUG K, PAULY S, *et al.* Arthroscopic single-row modified mason-allen repair versus double-row suture bridge reconstruction for supraspinatus tendon tears: A matched-pair analysis [J]. *Am J Sports Med*, 2012, 40(12): 2777-2785.
- [17] PARK MC, PETERSON AB, MCGARRY MH, *et al.* Knotless transosseous-equivalent rotator cuff repair improves biomechanical self-reinforcement without diminishing footprint contact compared with medial knotted repair [J]. *Arthroscopy*, 2017, 33(8): 1473-1481.
- [18] MALL NA, LEE AS, CHAHAL J, *et al.* Transosseous-equivalent rotator cuff repair: A systematic review on the biomechanical importance of tying the medial row [J]. *Arthroscopy*, 2013, 29(2): 377-386.
- [19] MONTANEZ A, MAKAREWICH CA, BURKS RT, *et al.* The medial stitch in transosseous-equivalent rotator cuff

- repair; Vertical or horizontal mattress? [J]. *Am J Sports Med*, 2016, 44(9): 2225-2230.
- [20] VIRK MS, BRUCE B, HUSSEY KE, *et al.* Biomechanical performance of medial row suture placement relative to the musculotendinous junction in transosseous equivalent suture bridge double-row rotator cuff repair [J]. *Arthroscopy*, 2017, 33(2): 242-250.
- [21] WIESER K, RAHM S, FARSHAD M, *et al.* Stitch positioning influences the suture hold in supraspinatus tendon repair [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2013, 21(7): 1587-1592.
- [22] PARK JS, MCGARRY MH, CAMPBELL ST, *et al.* The optimum tension for bridging sutures in transosseous-equivalent rotator cuff repair: A cadaveric biomechanical study [J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(9): 2118-2125.
- [23] SANO H, YAMASHITA T, WAKABAYASHI I, *et al.* Stress distribution in the supraspinatus tendon after tendon repair: Suture anchors versus transosseous suture fixation [J]. *Am J Sports Med*, 2007, 35(4): 542-546.
- [24] TASHJIAN RZ, HOY RW, HELGERSON JR, *et al.* Biomechanical comparison of transosseous knotless rotator cuff repair versus transosseous equivalent repair: Half the anchors with equivalent biomechanics? [J]. *Arthroscopy*, 2018, 34(1): 58-63.
- [25] 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.
- [26] NHO SJ, DELOS D, YADAV H, *et al.* Biomechanical and biologic augmentation for the treatment of massive rotator cuff tears [J]. *Am J Sports Med*, 2010, 38(3): 619-629.
- [27] LIN J, SUN Y, CHEN Q, *et al.* Outcome comparison of graft bridging and superior capsule reconstruction for large to massive rotator cuff tears: A systematic review [J]. *Am J Sports Med*, 2020, 48(11): 2828-2238.
- [28] LENART BA, MARTENS KA, KEARNS KA, *et al.* Treatment of massive and recurrent rotator cuff tears augmented with a poly-l-lactide graft, a preliminary study [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2015, 24(6): 915-921.
- [29] SUNWOO JY, MURRELL GAC. Interposition graft repair of irreparable rotator cuff tears: A review of biomechanics and clinical outcomes [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2020, 28(19): e829-e38.
- [30] MIHATA T, MCGARRY MH, KAHN T, *et al.* Biomechanical effect of thickness and tension of fascia lata graft on glenohumeral stability for superior capsule reconstruction in irreparable supraspinatus tears [J]. *Arthroscopy*, 2016, 32(3): 418-426.
- [31] MIHATA T, MCGARRY MH, KAHN T, *et al.* Biomechanical role of capsular continuity in superior capsule reconstruction for irreparable tears of the supraspinatus tendon [J]. *Am J Sports Med*, 2016, 44(6): 1423-1430.
- [32] MIHATA T, BUI CNH, AKEDA M, *et al.* A biomechanical cadaveric study comparing superior capsule reconstruction using fascia lata allograft with human dermal allograft for irreparable rotator cuff tear [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2017, 26(12): 2158-2166.
- [33] CURTIS DM, LEE CS, QIN C, *et al.* Superior capsule reconstruction with subacromial allograft spacer: Biomechanical cadaveric study of subacromial contact pressure and superior humeral head translation [J]. *Arthroscopy*, 2020, 36(3): 680-686.
- [34] PARK MC, DETOC E, LEE TQ. Anterior cable reconstruction: Prioritize rotator cable and tendon cord when considering superior capsular reconstruction [J]. *Arthroscopy*, 2022, 38(5): 1705-1713.
- [35] DENARD PJ, PARK MC, MCGARRY MH, *et al.* Biomechanical assessment of a V-shaped semitendinosus allograft anterior cable reconstruction for irreparable rotator cuff tears [J]. *Arthroscopy*, 2022, 38(3): 719-728.
- [36] VEEN EJD, KOOREVAAR CT, DIERCKS RL. Using the long head of biceps tendon autograft as an anatomical reconstruction of the rotator cable: An arthroscopic technique for patients with massive rotator cuff tears [J]. *Arthrosc Tech*, 2018, 7(7): e699-e703.
- [37] GALASSO O, MANTOVANI M, MURACCINI M, *et al.* The latissimus dorsi tendon functions as an external rotator after arthroscopic-assisted transfer for massive irreparable posterolateral rotator cuff tears [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2020, 28(7): 2367-2376.
- [38] CLOUETTE J, LEROUX T, SHANMUGARAJ A, *et al.* The lower trapezius transfer: A systematic review of biomechanical data, techniques, and clinical outcomes [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2020, 29(7): 1505-1512.
- [39] OMID R, STONE MA, LIN CC, *et al.* Biomechanical analysis of anterior capsule reconstruction and latissimus dorsi transfer for irreparable subscapularis tears [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2020, 29(2): 374-380.
- [40] LUO Z, LIN J, SUN Y, *et al.* Outcome comparison of latissimus dorsi transfer and pectoralis major transfer for irreparable subscapularis tendon tear: A systematic review [J]. *Am J Sports Med*, 2022, 50(7): 2032-2041.
- [41] 曹晓艳,方宁,田娜,等. 定向拉伸工艺对可吸收肩袖补片力学性能的影响 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(1): 27-34.
- CAO XY, FANG N, TIAN N, *et al.* Influences of unidirectional stretching process on mechanical properties of absorbable patch for rotator cuff repair [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(1): 27-34.
- [42] ZHAO S, SU W, SHAH V, *et al.* Biomaterials based strategies for rotator cuff repair [J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2017, 157: 407-416.
- [43] LIU Q, YU Y, REISDORF RL, *et al.* Engineered tendon-fibrocarrilage-bone composite and bone marrow-derived mesenchymal stem cell sheet augmentation promotes rotator cuff healing in a non-weight-bearing canine model [J]. *Biomaterials*, 2019, 192: 189-198.