

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20220401

• 短篇论著 •

缝线编织法预置高强度缝线对肌腱移植生物力学的影响

常 晗¹, 张 伟¹, 刘玉杰², 王 季¹, 李 飞¹, 齐 玮^{2*}

1. 中国人民解放军海军第九七一医院骨二科, 青岛 266071

2. 中国人民解放军总医院骨科, 北京 100853

[摘要] **目的** 通过缝线编织法对肌腱移植预置高强度缝线, 以减轻术后肌腱移植发生蠕变松弛所造成的力学影响。**方法** 取新鲜猪跟腱标本, 制成前交叉韧带肌腱移植 30 个, 随机分为对照组、2 股缝线置入组、4 股缝线置入组, 每组 10 个。对照组肌腱移植不予缝线置入, 2 股缝线置入组、4 股缝线置入组在肌腱移植内分别预置 2 股、4 股高强度 2 号缝线。各组肌腱移植依次完成 1、100、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 次疲劳测试, 记录松弛度。最后以 5 cm/min 的恒定速率牵拉各组肌腱移植至其失效, 并记录松弛度达到 5 mm 时的牵引力, 即失效载荷。**结果** 2 股缝线置入组、4 股缝线置入组肌腱移植各次疲劳测试后松弛度均小于对照组, 且 4 股缝线置入组松弛度小于 2 股缝线置入组, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$)。2 股缝线置入组、4 股缝线置入组肌腱移植失效载荷均高于对照组, 且 4 股缝线置入组失效载荷高于 2 股缝线置入组, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$)。**结论** 通过缝线编织法对肌腱移植进行预置线操作可有效提高肌腱移植的生物力学性能。

[关键词] 肌腱移植; 缝线编织; 生物力学; 运动医学

[引用本文] 常晗, 张伟, 刘玉杰, 等. 缝线编织法预置高强度缝线对肌腱移植生物力学的影响[J]. 海军军医大学学报, 2024, 45(12): 1579-1582. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20220401.

Biomechanical effect of pre-setting high-strength sutures by suture weaving on tendon grafts

CHANG Han¹, ZHANG Wei¹, LIU Yujie², WANG Ji¹, LI Fei¹, QI Wei^{2*}

1. Department of Orthopedics (II), No. 971 Hospital of PLA Navy, Qingdao 266071, Shandong, China

2. Department of Orthopedics, PLA General Hospital, Beijing 100853, China

[Abstract] **Objective** To reduce the mechanical impact caused by postoperative creep and relaxation of tendon grafts by pre-setting high-strength sutures using suture weaving. **Methods** Fresh pig tendo calcaneus specimens were used to prepare 30 anterior cruciate ligament tendon grafts, and they were randomly divided into control group, 2-strand suture implantation group, and 4-strand suture implantation group, with 10 tendon grafts in each group. The control group were not given suture implantation in the tendon grafts, and the 2- and 4-strand suture implantation groups were pre-set 2 and 4 strands of high-strength No. 2 sutures, respectively. The tendon grafts in each group were subjected to 1, 100, 500, 1 000, 1 500, 2 000, 2 500, and 3 000 fatigue tests in turn, and the relaxation was recorded. Finally, the tendon grafts in each group were pulled to failure at a constant rate of 5 cm/min, and the traction force when the relaxation reached 5 mm, i.e. the failure load, was recorded. **Results** The relaxation of tendon grafts after each fatigue test was significantly lower in the 2- and 4-strand suture implantation groups than that in the control group, and the relaxation was significantly lower in the 4-strand suture implantation group than that in the 2-strand suture implantation group (all $P < 0.05$). The failure loads of tendon grafts were significantly higher in the 2- and 4-strand suture implantation groups than that in the control group, and the failure load was significantly higher in the 4-strand suture implantation group than that in the 2-strand suture implantation group (all $P < 0.05$). **Conclusion** Pre-setting high-strength sutures in tendon grafts by suture weaving can effectively improve the mechanical properties of tendon grafts.

[Key words] tendon grafts; suture weaving; biomechanics; sports medicine

[Citation] CHANG H, ZHANG W, LIU Y, et al. Biomechanical effect of pre-setting high-strength sutures by suture weaving on tendon grafts[J]. Acad J Naval Med Univ, 2024, 45(12): 1579-1582. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20220401.

近年来, 膝关节前交叉韧带损伤的发生率呈明显上升趋势^[1]。前交叉韧带损伤会导致膝关节力学失衡、运动轨迹异常、异常撞击增加, 如不能及

时治疗, 不仅会引起膝关节功能紊乱^[2], 还会加速半月板、关节软骨等膝关节附属结构的损耗^[3], 最终导致膝关节功能出现不可逆损伤。利用关节镜

[收稿日期] 2022-05-11

[接受日期] 2023-02-23

[作者简介] 常 晗, 硕士, 主治医师. E-mail: 345360112@qq.com

*通信作者 (Corresponding author). Tel: 010-66938206, E-mail: qiwei301@126.com

微创重建前交叉韧带具有切口小、对膝关节内环境破坏少、更快恢复膝关节运动功能等优点, 已成为目前临床上广泛开展的术式。然而, 目前研究多聚焦于如何提升前交叉韧带肌腱移植物的初始固定强度^[4], 对其转归过程中移植物蠕变所导致的力学性能丧失关注甚少。本研究采用缝线编织法对肌腱移植物预置高强度肌腱线, 以分散部分张力、保护肌腱移植物、预防蠕变松弛, 并进行生物力学验证。

1 材料和方法

1.1 器材与仪器 Ultrabraid™ 2 号高强度肌腱线 (美国 Smith & Nephew 公司), Ethibond Excel™ 2 号缝线 (美国强生公司), ElectroPuls E10000 动态生物力学试验机 (美国 Instron 公司)。

1.2 实验标本 根据 Wilhelm 等^[5]的研究, 猪的性别对肌腱生物力学强度没有明显影响, 但是在肌腱损伤后的炎症反应及愈合病理过程中, 性激素水平会产生一定影响, 宏观表现为愈合时间、愈合强度存在差异。根据 Zhang 等^[6]的研究, 6 个月龄的幼年猪可作肌腱生物力学研究的可靠供体。因此, 本研究选取不限雌雄、月龄 6~7 个月的猪 15 只 (由解放军总医院动物实验中心提供), 取新鲜跟腱精细剔除残余的腓肠肌及其筋膜, 注意避免损伤肌腱。根据 Pownder 等^[7]的研究, 将制备好的标本保存于 -20 °C 恒温恒湿冰箱内, 以最大程度保留其力学性能。通过设计实验流程, 保证各组标本冰冻保存时间一致, 以降低冰冻时间差异所造成的误差。

1.3 标本分组与处理 统一修整各组肌腱移植物, 将其修剪为直径 8 mm、长 12 cm; 移植物游离端采用 2 号缝线编织缝合约 3 cm, 最终得到 30 个肌腱移植物标本, 编号后放入 -20 °C 冰箱保存。将 30 个肌腱移植物标本按照随机数字表法分成 3 组, 分别为对照组、2 股缝线置入组及 4 股缝线置入组, 每组 10 个。对照组肌腱移植物不予缝线置入, 2 股缝线置入组肌腱移植物内预置 1 根 2 号高强度肌腱线 (肌腱对折后为 2 股), 4 股缝线置入组肌腱移植物内预置 2 根 2 号高强度肌腱线 (肌腱对折后为 4 股)。具体操作如下: 应用预张力平台以 10 N 的牵引力预张肌腱移植物标本, 2 股缝线置入组的标本采用半月板缝合针纵行穿入 1 根 2 号高强度肌腱线, 选取标本截面中心为进针点, 进针时时刻注

意入针方向, 使其与标本长轴平行, 将 2 号高强度肌腱线植入移植物内部; 4 股缝线置入组肌腱移植物标本采取相同办法置入 2 根 2 号高强度肌腱线 (图 1)。

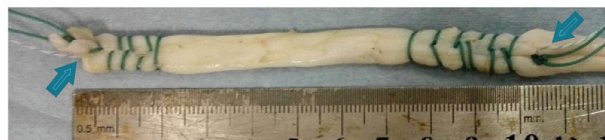


图 1 肌腱移植物内置入 2 股 2 号高强度肌腱线 (箭头所示)

1.4 生物力学测试 首先对肌腱移植物标本进行预张 (牵引力 20 N、10 min), 2 股缝线置入组及 4 股缝线置入组需在预张后将置入的缝线与肌腱两端编织尾线各自相互打结固定 (图 2A)。然后将标本安装于动态生物力学试验机, 两端用专业夹具固定, 夹具间肌腱长度调整为 3 cm (图 2B), 上端采用悬吊固定, 下端为挤压固定。安装完成后首先进行 20 轮预负荷 (牵引力 0~50 N), 然后进行 3 000 轮疲劳测试 (牵引力 50~250 N), 频率均设定为 1 Hz。最后以 5 cm/min 的恒定速率牵拉至标本失效。实验全程以 20 Hz 频率记录牵引力及对应的位移, 预负荷后夹具间肌腱距离定义为初始长度, 疲劳测试后夹具间肌腱距离定义为终末长度, 两者差值为松弛度。松弛度达到 5 mm 时, 两夹具间的牵引力为失效载荷。

提取 3 组标本第 1、100、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 次疲劳测试时的数据, 以及最终失效试验中的位移与牵引力变化。本研究为相同操作人员使用相同实验器械并在相同条件下完成。所有指标均由动态生物力学试验机测量并记录。

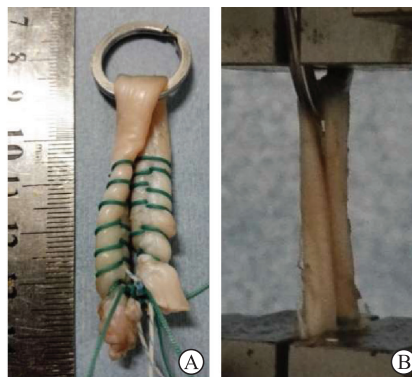


图 2 肌腱移植物标本的固定

A: 预置缝线末端外科结固定; B: 标本固定于动态生物力学试验机。

1.5 统计学处理 采用 SPSS 19.0 软件处理数据。计量资料服从正态分布、方差齐, 以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 组间比较采用单因素方差分析, 两两比较采用 Dunnett-*t* 检验或 Student-Newman-Keuls *q* 检验。检验水准 (α) 为 0.05。

2 结 果

由表 1 可见, 在第 1、100、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 次疲劳测试后, 3 组肌腱移植物的松弛度差异均有统计学意义 (均 $P < 0.001$); 两两比较结果显示, 2 股缝线置入组、4 股缝线置

入组各次疲劳测试后肌腱移植物的松弛度均小于对照组, 且 4 股缝线置入组松弛度小于 2 股缝线置入组, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$)。对照组、2 股缝线置入组、4 股缝线置入组肌腱移植物的失效载荷分别为 (419.362±67.791)、(668.753±159.683)、(876.575±78.171) N, 3 组之间差异有统计学意义 ($F = 46.361, P < 0.001$); 两两比较结果显示, 2 股缝线置入组、4 股缝线置入组肌腱移植物的失效载荷均高于对照组, 且 4 股缝线置入组失效载荷高于 2 股缝线置入组, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.001$)。

表 1 各组肌腱移植植物在不同次数的疲劳测试后生物力学指标比较

mm, $n = 10, \bar{x} \pm s$								
组别	1 次	100 次	500 次	1 000 次	1 500 次	2 000 次	2 500 次	3 000 次
对照组	1.948±0.384	2.804±0.326	3.246±0.314	3.339±0.411	3.468±0.441	3.529±0.427	3.592±0.446	3.674±0.482
2 股缝线置入组	1.530±0.209*	2.036±0.222*	2.219±0.250*	2.301±0.231*	2.427±0.259*	2.525±0.223*	2.545±0.286*	2.586±0.240*
4 股缝线置入组	1.245±0.242* [△]	1.628±0.213* [△]	1.733±0.310* [△]	1.835±0.416* [△]	1.882±0.583* [△]	1.934±0.580* [△]	1.943±0.658* [△]	1.954±0.769* [△]
<i>F</i> 值	18.041	41.184	59.624	65.154	66.384	71.682	68.275	71.781
<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

* $P < 0.05$ 与对照组比较; [△] $P < 0.05$ 与 2 股缝线置入组比较。

3 讨 论

目前中国人民解放军海军第九七一医院行前交叉韧带重建术 (anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR) 多采用自体腘绳肌腱, 辅以少量腓骨长肌腱。研究表明, ACLR 术后移植物转归会经历一系列复杂的病理生理变化, 包括缺血期、微血管再生期、胶原重建期、纤维塑形期等, 完整周期平均需要 1 年^[8]。在术后肌腱移植物转归过程中, 移植物逐步开始蠕变、显微结构发生重大变化^[9]。在早期缺血期, 移植物固有细胞发生大量坏死, 导致其密度减低、显微结构向疏松转变、胶原纤维框架间开始产生大量间隙; 第 2 个月开始进入微血管再生期, 自体细胞与新生的微血管在细胞因子作用下, 从关节液、韧带周围滑膜组织、前交叉韧带残端及腱骨界面不断侵蚀移植物, 细胞增殖、微血管生长及胶原纤维的溶解和重建在术后平均 6~8 周将达到高峰, 此时移植物蠕变最为严重, 各项力学指标下降明显。在此阶段, 一般日常运动和功能锻炼所引起的张力负荷, 也可能造成肌腱移植植物松弛失效^[10]。

Brophy 等^[11]提出了相对保守的功能锻炼计划, ACLR 术后患肢功能位石膏固定 6 周, 术后 3 周可扶拐或在助行器辅助下下地行走, 以避免患肢负

重; 术后 4 个月逐渐练习负重直至 8 个月开始脱拐行走。此方案强调较长时间的制动, 以最大程度避免移植植物在蠕变阶段受到负荷而松弛失效, 一定程度上有利于腱骨愈合, 然而长期制动会引起膝关节僵硬、肌肉萎缩、骨量流失及软骨退行性病变等不良后果。术后开展早期功能锻炼虽然可以获得更高的膝关节运动功能评分^[12], 但不能解决肌腱移植植物转归蠕变时期松弛失效的问题。过早、过量、缺乏保护的功能锻炼反而会导致肌腱移植植物损伤松弛, 影响关节运动功能的康复。

当前临床采用的众多固定方法更关注腱骨界面的初始固定强度^[13], 针对肌腱移植植物转归蠕变时期的保护尚处空白。为了在早期功能锻炼中保护肌腱移植植物, 本研究采用缝线编织法在肌腱移植植物内预置高强度肌腱线, 在转归蠕变期为其分散部分张力, 提供一定程度的张力遮挡, 增强肌腱移植植物的力学性能, 预防其损伤松弛。研究结果证实各次疲劳测试后 2 股缝线置入组和 4 股缝线置入组松弛度均小于对照组, 失效载荷明显提高。此外, 2 股缝线置入组失效载荷的标准差与对照组和 4 股缝线置入组相比比较大, 说明其离散程度较大, 考虑在缝线和肌腱 2 种不同材质组成的张力系统中, 单线环构成的 2 股缝线可靠程度较差, 不如双线环构成的

4股缝线稳定性较好。

本研究的不足之处在于仅进行了离体生物力学研究,虽然研究结果显示置入高强度肌腱线可有效提高肌腱移植物的力学性能,但是在移植物复杂生理学转变过程中,缝线编织法在转归的不同阶段对移植物系统具体的力学影响,如缝线的张力遮挡效应会对纤维细胞的再生塑形产生怎样的影响,以及异物置入是否会对长期的腱骨愈合造成不良影响等^[14-15],尚有待于进一步的动物实验和临床研究加以探讨。

参考文献

- [1] SVANTESSON E, SENORSKI E H, WEBSTER K E, et al. Clinical outcomes after anterior cruciate ligament injury: panther symposium ACL injury clinical outcomes consensus group[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2020, 28(8): 2415-2434. DOI: 10.1007/s00167-020-06061-x.
- [2] HEWETT T E, MYER G D, FORD K R, et al. Mechanisms, prediction, and prevention of ACL injuries: cut risk with three sharpened and validated tools[J]. *J Orthop Res*, 2016, 34(11): 1843-1855. DOI: 10.1002/jor.23414.
- [3] PADUA D A, DISTEFANO L J, HEWETT T E, et al. National athletic trainers' association position statement: prevention of anterior cruciate ligament injury[J]. *J Athl Train*, 2018, 53(1): 5-19. DOI: 10.4085/1062-6050-99-16.
- [4] JIANG X D, ZHENG H L, YANG Y P. Outcome of posterior wall blowout in anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction via anteromedial portal approach: a retrospective research in 20 patients with 6 years follow-up[J]. *Chin J Traumatol*, 2019, 22(1): 24-28. DOI: 10.1016/j.cjte.2018.12.002.
- [5] WILHELM C J, ENGBRECHT M A, BURGKART R, et al. Fine tuning of the side-to-side tenorrhaphy: a biomechanical study assessing different side-to-side suture techniques in a porcine tendon model[J]. *PLoS One*, 2021, 16(10): e0257038. DOI: 10.1371/journal.pone.0257038.
- [6] ZHANG J, LI F, WILLIAMSON K M, et al. Characterization of the structure, vascularity, and stem/progenitor cell populations in porcine Achilles tendon (PAT)[J]. *Cell Tissue Res*, 2021, 384(2): 367-387. DOI: 10.1007/s00441-020-03379-3.
- [7] POWNDER S L, SHAH P H, POTTER H G, et al. The effect of freeze-thawing on magnetic resonance imaging T₂* of freshly harvested bovine patellar tendon[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2015, 5(3): 368-373. DOI: 10.3978/j.issn.2223-4292.2015.03.14.
- [8] MARS GROUP. Rehabilitation predictors of clinical outcome following revision ACL reconstruction in the MARS cohort[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2019, 101(9): 779-786. DOI: 10.2106/JBJS.18.00397.
- [9] 张博,任世祥,林源.关节镜下重建治疗痛风性前交叉韧带损伤的临床效果[J]. *第二军医大学学报*, 2021, 42(8): 937-940. DOI: 10.16781/j.0258-879x.2021.08.0937.
- [10] ZHANG B, REN S X, LIN Y. Clinical effect of arthroscopic reconstruction in the treatment of gouty anterior cruciate ligament injury[J]. *Acad J Sec Mil Med Univ*, 2021, 42(8): 937-940. DOI: 10.16781/j.0258-879x.2021.08.0937.
- [11] HU B, GAO F, LI C, et al. A comparative analysis of the efficacy of anterior cruciate ligament reconstruction with autologous ligament grafting at different time points[J]. *J Clin Lab Anal*, 2020, 34(12): e23543. DOI: 10.1002/jcla.23543.
- [12] BROPHY R H, HAAS A K, HUSTON L J, et al. Association of meniscal status, lower extremity alignment, and body mass index with chondrosis at revision anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(7): 1616-1622. DOI: 10.1177/0363546515578838.
- [13] WRIGHT R W, PRESTON E, FLEMING B C, et al. A systematic review of anterior cruciate ligament reconstruction rehabilitation: part I: continuous passive motion, early weight bearing, postoperative bracing, and home-based rehabilitation[J]. *J Knee Surg*, 2008, 21(3): 217-224. DOI: 10.1055/s-0030-1247822.
- [14] TAY K S, TAN A H C. Clinical outcomes, return to sports, and patient satisfaction after anterior cruciate ligament reconstruction in young and middle-aged patients in an Asian population-a 2-year follow-up study[J]. *Arthroscopy*, 2018, 34(4): 1054-1059. DOI: 10.1016/j.arthro.2017.10.039.
- [15] ERICKSON L N, LUCAS K C H, DAVIS K A, et al. Effect of blood flow restriction training on quadriceps muscle strength, morphology, physiology, and knee biomechanics before and after anterior cruciate ligament reconstruction: protocol for a randomized clinical trial[J]. *Phys Ther*, 2019, 99(8): 1010-1019. DOI: 10.1093/ptj/pzz062.
- [16] DOMNICK C, RASCHKE M J, HERBORT M. Biomechanics of the anterior cruciate ligament: physiology, rupture and reconstruction techniques[J]. *World J Orthop*, 2016, 7(2): 82-93. DOI: 10.5312/wjo.v7.i2.82.

[本文编辑] 孙 岩