

剪切波弹性成像在肌肉骨骼系统检测中的应用进展

林晓君 李振洲 王慧芳

摘 要 剪切波弹性成像技术可评估肌肉、肌腱、韧带及神经等组织内部力学特性的变化,对早期诊断这些组织疾病及制定治疗方案具有重要的参考价值。本文就剪切波超声弹性技术的成像原理及其在肌肉骨骼系统的应用研究进展进行综述,并对此技术的前景进行展望。

关键词 剪切波弹性成像;肌腱;韧带;肌肉;外周神经

[中图分类号] R445.1

[文献标识码] A

Progress of shear wave elastography in detection of musculoskeletal system

LIN Xiaojun, LI Zhenzhou, WANG Huifang

Guangzhou Medical University, Guangzhou 510182, China

ABSTRACT Shear wave elastography can be used to evaluate the changes of the internal mechanical properties of muscles, tendons, ligaments and nerves, and has important reference value for early diagnosis of the above tissue diseases and the development of treatment plans. The paper reviews the imaging principle of shear wave ultrasonic elastic technique, which can be applied in musculoskeletal system. The prospect of the technique is also prospected.

KEY WORDS Shear wave elastography; Tendon; Ligament; Muscle; Peripheral nerve

超声检查技术近十年得到了飞速发展,高频探头可在高空间分辨率下显示肌腱、韧带和皮下组织等浅表组织的精细结构。以往,超声仅能获得组织结构的形态学信息,评估软硬度则需要通过临床触诊。超声弹性成像是在传统二维超声的基础上获取组织的弹性,提高组织分辨率。剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)可以实时定量检测软组织弹性数值,从而获得与软组织退化、损伤和愈合相关的力学性质的定量信息。本文就 SWE 的基本原理及其在骨骼肌、肌腱、韧带及神经中的应用研究进行综述。

一、SWE 的基本原理

SWE 采用“马赫锥”原理,通过发射声辐射脉冲对组织施加激励产生剪切波,剪切波传播速度值经彩色编码转换为实时彩色图像,从而反映组织的硬度。红色图像表示硬度高,绿色图像表示硬度低^[1]。SWE 产生剪切波不依赖外力,具有安全、有效、准确且重复性好的优点,因而越来越多的国内外学者应用 SWE 评估肌腱及韧带损伤后的力学特性。SWE 结合二维超声可提高超声检查对肌肉骨骼系统早期病变的诊断准确率,对疾病的鉴别诊断也起到积极作用。此外, SWE 可实时监测,为超声引导下穿刺介入治疗的实施及疗效评估提供重要帮助。临床常用剪切模

量、剪切波速度和杨氏模量定义组织弹性。剪切模量是指剪切力的阻力(单位:kPa)。在软组织中,超声波会发生两种波的传播模式,即纵波(粒子沿波传播方向振荡)和横波(粒子在横波传播的方向上振荡),其中横波传播速度也称为剪切波速度(单位:m/s),是弹性模量值之一。杨氏模量 $=3\rho c^2$,其中 ρ 表示组织密度, c 表示剪切波速度,当在均匀、各向同性的弹性组织模型中,比如人体的肝脏和乳腺, ρ 可设定为 1000 kg/m^3 , 杨氏模量和剪切波速度可直接通过此公式进行换算。而肌纤维由于走行交错导致肌腱和韧带的弹性分布是不均匀的,具备各向异性组织的杨氏模量则不适用于这个公式;美国食品药品监督管理局推荐使用剪切波速度评估组织弹性值^[2]。

二、SWE 在肌腱、韧带检测的应用研究

1. SWE 在肌腱检测方面的应用。SWE 可准确定位、实时观察并行双侧对比扫查,近年来已被用于检查健康志愿者和异常肌腱的患者。肌腱的紧张程度与其弹性测值密切相关,同时肌腱内部结构复杂,肌纤维的相互渗透和旋转导致 SWE 在实际扫查过程中无法时刻保持声束与肌纤维走行完全垂直,从而出现各向异性伪像,因此需要在肌腱不同切面和功能状态下分别评估其弹性值。研究^[3]表明,跟腱在横切面和纵切面、踝关节伸展

基金项目:深圳市医疗卫生三名工程项目(SZSM201612027)

作者单位:510182 广州市,广州医科大学(林晓君);深圳市第二人民医院超声诊断科(李振洲、王慧芳)

通讯作者:王慧芳, Email: kuangwhf2006@126.com

位和背屈位下测得的弹性值差异较大。Aubry 等^[4]研究发现,在踝关节伸展位上,健康跟腱纵切面剪切波速度为 15.55 m/s,横切面为 5.29 m/s,各向异性系数为 0.66(各向异性系数是定量分析超声波在不同方向上传播的各向异性指标,数值越高,各向异性越明显);而于踝关节背屈位下,健康跟腱纵切面剪切波速度为 7.03 m/s,横切面为 4.76 m/s,各向异性系数为 0.33。Fu 等^[3]研究发现,在踝关节处于完全放松的姿势下,健康跟腱纵切面剪切波速度为 8.26 m/s,横切面为 4.10 m/s,各向异性系数为 0.50。肌腱在正常状态下是一个相对较硬的组织,在发生损伤或退行性变时,肌腱的硬度出现不同程度的改变。Chen 等^[5]研究指出健康跟腱的平均弹性值约为 291 kPa(261~300 kPa),而跟腱断裂时的平均弹性值约为 56 kPa(3~228 kPa)。Zhang 等^[6]随访撕裂跟腱修复术后 48 周患者的研究表明,跟腱平均弹性值及功能评分与术前比较差异均有统计学意义(均 $P<0.05$),修复术后跟腱的弹性值与肌腱功能显著相关($OR=0.9159, P=0.0003$),表明 SWE 可用于评估跟腱愈合过程的生物力学信息,并预测肌腱功能状态。

2.SWE 在韧带检测方面的应用。Kot 等^[1]研究发现,不同程度的压力对髌韧带的弹性模量测值有影响。人为施加较大的力量会影响弹性测值的准确性,因此在 SWE 操作过程中应施加较小的压力。Porta 等^[7]通过分别测量 11 例健康者的 22 条髌韧带近、中、远段的弹性值来评估超声弹性成像的可行性及可重复性,由两名操作者分别检查每段髌韧带,研究表明操作者内和操作者间均显示较高的一致性。可见,SWE 可准确评估健康髌韧带,并有望为髌韧带疾病的诊断及鉴别诊断提供可靠依据。

三、SWE 在肌肉检测中的应用研究

临床通过触诊评估中风、脊髓损伤和肌病的肌肉痉挛状态,是一种定性和主观的评估方式。近年应用 SWE 研究肌肉的文献^[8-9]报道越来越多,其可在肌肉主动或被动运动的过程中实时观察,是一种定量且客观的评估方式,避免了侵入性的肌肉活检或繁琐的实验室肌力检查。Rosskopf 等^[10]测量健康冈上肌剪切波速度为 3.0 m/s。Koo 等^[11]在一项关于健康者胫骨前肌被动拉伸的研究中指出,随着踝关节足底屈曲角度的增加,杨氏模量在 7~35 kPa 呈指数增长,表明 SWE 是一种可定量评估骨骼肌弹性程度的方法。Shinohara 等^[12]分别测量了健康胫骨前肌在松弛和收缩状态下的剪切模量值为 (40.6 ± 1.0) kPa 和 (268.2 ± 25.0) kPa,腓肠肌于两种状态下则分别为 (16.5 ± 1.0) kPa 和 (225.4 ± 41.0) kPa,而 MRI 测量该两组肌肉松弛状态下报告值为 5~40 kPa,收缩状态下为 300 kPa,剪切波弹性测值在 MRI 弹性成像报告值的范围内,结果表明 SWE 具有较高的准确性。SWE 测值也与肌肉的力学性能及早期的肌肉损伤变性相关,Eby 等^[13]在其慢性脑梗死患者研究中发现,肱二头肌的力矩和肌肉弹性可随着肘关节的伸展而增加,同时表明在慢性脑梗死患者中被动运动存在广泛的个体差异,提出 SWE 可替代肌电图成为重要的辅助诊断方法。同样,Du 等^[14]应用 SWE 测得帕金森病症状显著患者、帕金森病无自觉症状患者和健康受试者的肱二头肌杨氏模量值分别为 (59.94 ± 20.91) kPa、 (47.77 ± 24.00) kPa 和 (24.28 ± 5.09) kPa,前两组数据显著高于健康受试者,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$);进一步证实 SWE 测值可反映肌肉的弹性情况,为临床疾病的早

期诊断提供客观依据。

四、SWE 在外周神经检测中的应用研究

周围神经系统疾病是常见的慢性疾病,而腕管综合征则是最常见的神经卡压性疾病。当腕管长期受压,正中神经外膜增厚,疤痕增生、神经纤维变性发生水肿或纤维化,导致神经硬度值增加。以往临床医师依靠体格检查、实验室及电生理检查综合判断,诊断依据较主观,电刺激亦带给被检查者不良体验感。而 SWE 技术可实时获取弹性值,客观反映组织的病理生理状态,具有较高的特异性及敏感性。Kantarci 等^[15]最先使用 SWE 技术评估腕管入口处正中神经的弹性程度,研究结果表明腕管综合征患者的正中神经硬度明显高于对照组($P<0.05$);且正中神经弹性模量值 >40.4 kPa 时可高度怀疑腕管综合征。吕秀花等^[16]应用 SWE 定量检测 85 例因手麻而就诊的患者正中神经的弹性模量值,结果显示豌豆骨水平正中神经的弹性模量值为 (68.24 ± 27.01) kPa,前臂区距离腕横纹上 5 cm 处正中神经弹性的弹性模量值为 (59.65 ± 29.90) kPa,均较正常对照组 [(47.37 ± 14.16) kPa、 (44.97 ± 13.37) kPa] 增加,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$);两个弹性参数对应的 ROC 曲线下面积分别为 0.886、0.845,以此证明 SWE 技术评估正中神经具有较高的可行性及较好的临床应用价值。

五、SWE 在肌肉骨骼系统检测中的不足及展望

到目前为止,SWE 技术应用于肌肉骨骼系统的研究样本量均较少,难免存在一定的抽样误差;肌骨软组织大多位置表浅,不可避免会受到外力等因素干扰影响弹性测值。此外,弹性成像反映的是组织硬度,不同组织之间的硬度存在一定的重叠,如病变组织内部处于钙化、纤维化、出血或坏死等病理状态,则会导致部分病变无法根据现有标准进行评估^[17],导致假阳性或假阴性结果的产生。

综上所述,SWE 是一种新型的超声评估技术,可在静息状态下无需施加外力实时测量软组织弹性数值,可作为评估组织力学特征的新手段,有较高的临床诊断价值。未来随着弹性成像多中心的应用推广,大样本量临床数据的采集,以及操作指南和诊断标准的制定,相信 SWE 技术将在肌肉骨骼系统疾病的诊断和治疗监测中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Kot BC,Zhang ZJ,Lee AW,et al.Elastic modulus of muscle and tendon with shear wave ultrasound elastography:variations with different technical settings[J]. PLoS One, 2012, 7(8):44348.
- [2] Cosgrove D,Piscaglia F,Bamber J,et al.EFSUMB guidelines and recommendations on the clinical use of ultrasound elastography.Part 2: clinical applications[J]. Ultrascall Med,2013,34(3):238-253.
- [3] Fu S,Cui L,He X,Sun Y. Elastic characteristics of the normal Achilles tendon assessed by virtual touch imaging quantification shear wave elastography[J]. Ultrasound Med,2016,35(9):1881-1887.
- [4] Aubry S,Nueffer JP,Tanter M,et al.Viscoelasticity in Achilles tendonopathy:quantitative assessment by using real-time shear-wave elastography[J]. Radiology,2015,274(3):821-829.

- [5] Chen XM, Cui LG, He P, et al. Shear wave elastographic characterization of normal and torn achilles tendons: a pilot study[J]. *Ultrasound Med*, 2013, 32(3): 449–455.
- [6] Zhang LN, Wan WB, Wang YX, et al. Evaluation of elastic stiffness in healing Achilles tendon after surgical repair of a tendon rupture using in vivo ultrasound shear wave elastography[J]. *Med Sci Monit*, 2016, 22(1): 1186–1191.
- [7] Porta F, Damjanov N, Galluccio F, et al. Ultrasound elastography is a reproducible and feasible tool for the evaluation of the patellar tendon in healthy subjects[J]. *Int J Rheum Dis*, 2014, 17(7): 762–766.
- [8] Bar-On L, Slane LC. Shear wave elastography for the assessment of muscle stiffness in children with CP: insights and challenges[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2016, 58(12): 1209–1210.
- [9] Brandenburg JE, Eby SF, Song P, et al. Quantifying passive muscle stiffness in children with and without cerebral palsy using ultrasound shear wave elastography[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2016, 58(12): 1288–1294.
- [10] Rosskopf AB, Ehrmann C, Buck FM, et al. Quantitative shear-wave US elastography of the supraspinatus muscle: reliability of the method and relation to tendon integrity and muscle quality[J]. *Radiology*, 2016, 278(2): 465–474.
- [11] Koo TK, Guo JY, Cohen JH, et al. Quantifying the passive stretching response of human tibialis anterior muscle using shear wave elastography[J]. *Clin Biomech*, 2014, 29(1): 33–39.
- [12] Shinohara M, Sabra K, Gennison JL, et al. Real-time visualization of muscle stiffness distribution with ultrasound shear wave imaging during muscle contraction[J]. *Muscle Nerve*, 2010, 42(3): 438–441.
- [13] Eby S, Zhao H, Song P, et al. Quantitative evaluation of passive muscle stiffness in chronic stroke[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2016, 95(12): 899–910.
- [14] Du LJ, He W, Cheng LG, et al. Ultrasound shear wave elastography in assessment of muscle stiffness in patients with Parkinson's disease: a primary observation[J]. *Clin Imaging*, 2016, 40(6): 1075–1080.
- [15] Kantarci F, Ustabasioglu FE, Delil S, et al. Median nerve stiffness measurement by shear wave elastography: a potential sonographic method in the diagnosis of carpal tunnel syndrome[J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(2): 434–440.
- [16] 吕秀花, 段云友, 张莉, 等. 剪切波弹性成像检测正中神经病变的初步研究[J]. *中华超声影像学杂志*, 2015, 24(2): 147–150.
- [17] 李文雪, 朱家安. 超声弹性成像在肌肉骨骼系统中的应用[J]. *中华医学超声杂志(电子版)*, 2015, 12(4): 263–265.

(收稿日期: 2018-03-10)

(上接第 829 页)

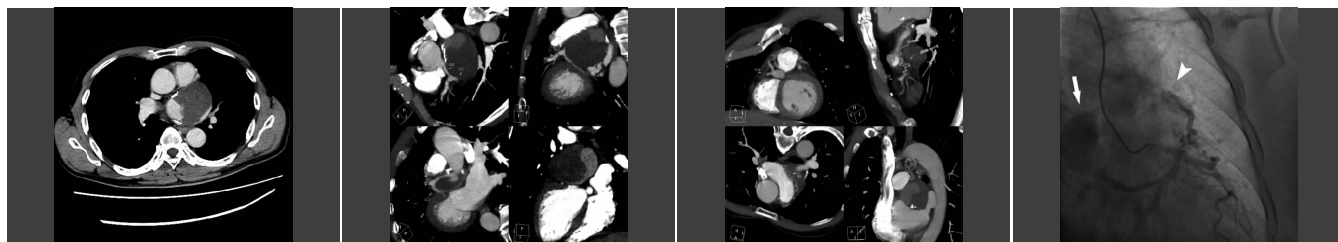


图 4 增强 CT 示病灶内团块明显 图 5 增强 CT 示病灶内强化区与冠状动脉左旋支-左房旋支远端相连 图 6 增强 CT 示冠状动脉(左、右远端膨大呈瘤样(箭头示), 左动脉圆锥支-肺动脉瘘及支气管动脉-肺动脉瘘 图 7 左冠状动脉造影显示左房旋支远端膨大呈瘤样(箭头示), 左动脉圆锥支-肺动脉瘘(无尾箭头示)

aneurysm, GCAA)^[5]。冠状动脉造影检查是诊断 GCAA 的“金标准”。本例经冠状动脉造影证实为左房旋支 GCAA, 并多发冠状动脉瘘, 临床上实属罕见。冠状动脉瘤的临床表现及心电图缺乏特异性, 本例患者行常规心脏超声检查偶然发现, 经胸部 CT 增强及冠状动脉造影得以明确诊断。因其瘤体内伴有大量附壁血栓且为冠状动脉远端病变, 其超声表现类似心脏肿瘤, 考虑到左冠状动脉受压, 使左房旋支流速减慢, 彩色多普勒未能有效地显示其血流; 行超声造影检查, 于左室显影后 3 个心动周期病灶内见较大范围微泡充填, 因超声造影为纯血池造影成像, 提示病灶存在血管性病变, 高度怀疑冠状动脉病变, 即常见的冠状动脉瘘、冠状动脉瘤及冠状静脉病变等, 因本例病灶呈椭圆形, 其内见类圆形微泡充填区, 故最终考虑为 GCAA 伴附壁血栓形成。

总之, 心脏超声造影可清晰显示 GCAA 的大小、形态及位置, 并可见超声造影剂充填, 附壁血栓表现为充盈缺损、无血流

灌注, 可作为辅助临床诊断 GCAA 的一种安全、简便、有效的影像检查手段。

参考文献

- [1] Syed M, Lesch M. Coronary artery aneurysm: a review[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 1997, 40(1): 77–84.
- [2] 李巖远, 胡盛寿, 孙立忠, 等. 巨大冠状动脉瘤的外科治疗[J]. *中华外科杂志*, 2006, 44(22): 1535–1537.
- [3] 匡锋, 周新民, 唐浩, 等. 多发巨大右冠状动脉瘤合并左心室瘘一例[J]. *中华心血管病杂志*, 2010, 38(3): 276–277.
- [4] 朱红. 超声心动图诊断回旋支-冠状静脉窦瘘合并回旋支动脉瘤形成 1 例[C]. 2012 年十一届全国超声心动图学术会议暨新技术国际研讨会论文集, 2012: 263.
- [5] Li D, Wu Q, Sun L, et al. Surgical treatment of giant coronary artery aneurysm[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2005, 130(3): 817–821.

(收稿日期: 2017-12-24)