

低频脉冲超声对大鼠骨骼肌疲劳的恢复效果研究

雷极英, 杨雪冰, 王春宁, 宋琳哲, 郭建中

(陕西师范大学物理学与信息技术学院陕西省超声重点实验室, 陕西西安 710062)

摘要: 建立大鼠的运动疲劳模型, 研究低频脉冲超声对骨骼肌运动疲劳的恢复效果, 通过对肌肉组织的物理(体重)和生化(肌酸激酶(Creatine Kinase, CK), 尿素氮(Blood Urea Nitrogen, BUN), 肌酐, 丙二醛和钙离子)指标分析, 研究低频脉冲超声与大鼠骨骼肌疲劳恢复效果的相关性。结果表明, 在进行超声照射后, 大鼠血清中的 CK 值和 BUN 值较疲劳组得到一定的缓解, 体重存在一定范围的上升。初步的实验表明低频脉冲超声对缓解肌肉的疲劳有一定的促进作用。

关键词: 超声治疗; 肌肉疲劳; 运动疲劳模型

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-04-0316-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.04.004

Effect of low-frequency pulsed ultrasound on recovery of skeletal muscle fatigue in rats

LEI Ji-ying, YANG Xue-bing, WANG Chun-ning, SONG Lin-zhe, GUO Jian-zhong

(Shaanxi Province Key Laboratory of Ultrasound, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, Shaanxi, China)

Abstract: The effect of low frequency pulsed ultrasound on the recovery of skeletal muscle fatigue is studied by establishing the exercise fatigue model in rats. The correlation between low frequency pulsed ultrasound and recovery of skeletal muscle fatigue in rats is investigated by analyzing physical (weight) and biochemical (CK, BUN, MDA, CRE and calcium) indexes of muscle tissue. The results show that the CK value and BUN value in the serum of the rats are more than those in the fatigue group (FG) after ultrasonic irradiation, and the body weight increases in a certain range. Preliminary experiments show that low-frequency pulsed ultrasound has a certain promoting effect on reliving muscle fatigue.

Key words: ultrasound treatment; muscle fatigue; motion fatigue model

0 引言

肌肉组织运动后的疲劳与恢复是肌肉组织的正常生理现象。促进肌肉组织运动疲劳状态的恢复, 对人们的正常生活, 特别是运动训练有重要的意义。我们知道, 按摩有助于缓解肌肉疲劳, 除此之外, Tavares F^[1]提出的冷水浸泡法, 利用在冷环境下血管的收缩, 降低组织由于炎症而引起的肌肉不适以及肿胀。Lisa E. Heaton^[2]提出的食疗方法, 通过对蛋白质、糖原和其他一些营养物质的搭配, 来加速细胞修复。但对于缓解肌肉疲劳来讲, 持续

时间较长, 且冷水浸泡法可能会影响训练中的肌肉尺寸适应性。陈思颖^[3]经过试验阐述了电刺激的效果在某些方面不如低频超声。

研究表明, 低频超声在细胞恢复、骨愈合^[4]、消除炎症^[5]等方面都取得了很好的效果。本文针对低频超声对细胞功能的恢复问题, 通过大鼠的运动模型, 研究肌肉组织运动疲劳的恢复效果。

1 实验模型

1.1 实验模型

实验模型是: 采用大鼠转轮式跑步机建立疲劳模型, 优势在于当大鼠出现心理排斥, 并减少运动趋势时, 仍可以被动地进行跑步训练, 使得模型更好地建立。

实验采用雄性斯泼累格·多雷(Sprague Dawley, SD)大鼠, 鼠龄 6 周龄, 体重 160±20 g。饲料

收稿日期: 2017-12-04; 修回日期: 2018-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(11574192、11727813)资助项目

作者简介: 雷极英(1993-), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向为医学超声。

通讯作者: 郭建中, E-mail: guojz@snnu.edu.cn

为大鼠专用饲料，自由饮食饮水，自然光照，温度适宜。将 SD 大鼠随机分成对照组(Control Group, CG)*3 只和实验组(Experimental Group, EG)*7 只，实验组又分为干预组(Intervention Group, IG)*2 只和疲劳组(Fatigue Group, FG)*5 只。实验流程如图 1 所示。

本文采取的肌肉状态表征参量是：

物理量：体重

生化指标：肌酸激酶(Creatine Kinase, CK)，血尿素氮 (Blood Urea Nitrogen, BUN)，肌酐 (Creatinine, CRE)，丙二醛(Malonaldehyde, MDA)和钙离子。



图 2 大鼠转轮式跑台照片
Fig.2 Picture of rat wheel runners

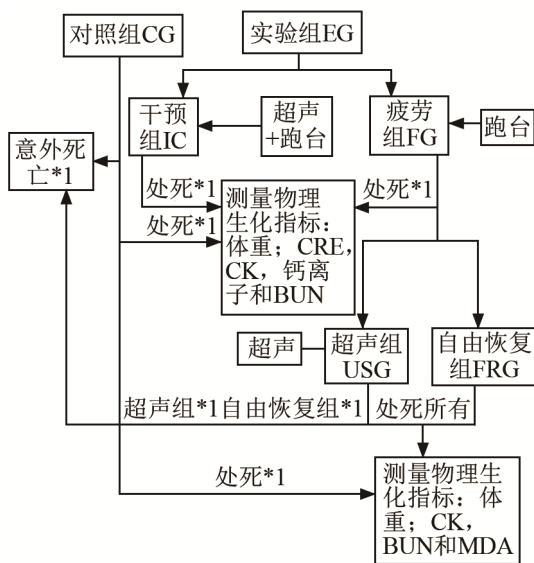


图 1 大鼠疲劳模型建立及超声治疗的实验流程图
Fig.1 Experimental flow chart of rat fatigue model establishment and ultrasonis treatment

1.2 实验方法

将大鼠按图 1 所示的实验流程，随机分成对照组(CG)和实验组(SG)，实验组又分成超声干预组(IG)和疲劳组(FG)。对照组不做任何处理，自由饮食饮水。实验组的大鼠在正式疲劳之前，进行 3 d 的适应性跑步训练^[6]，后进行为期 22 d 的转轮式跑步训练，适应性阶段和疲劳阶段的跑步强度和时间的参考 Bedford 理论设计^[7]。其中速度的单位是 $m \cdot min^{-1}$ ，时间的单位是 min。

表 1 大鼠疲劳运动训练方案($m \cdot min^{-1} \times min$)
Table 1 Rat fatigue exercise training program

天数	适应	1-2	2-4	4-6	6-11
	15×20	15×40	18×45	20×90	25×120
天数	11-14	14-19	19-21	22	
	28×120	30×120	30×140	力竭	

实验过程分为两个阶段，疲劳模型建立阶段(同时进行超声干预)时间为 22 d 和超声治疗阶段(进行超声照射治疗)时间为 14 d。

在疲劳模型建立期间，对干预组(IG)的两只大鼠的大腿前侧股四头肌进行超声干预，采用脉冲重复频率为 100 Hz，占空比 20%，中心频率为 1.5 MHz，强度为 $30 mW \cdot cm^{-2}$ 的低强度脉冲超声，每天照射时间为 20 min，照射周期为 22 d。对照组(CG)不做任何处理，疲劳组(FG)只做训练。在第 23 天，让干预组(IG)的所有大鼠跑到力竭，三组随机各处死一只。取其血液检测生化指标(CRE, CK, BUN 和钙离子)。干预阶段期间，每 3 d 测量一次体重。

在超声治疗阶段，将疲劳组(FG)中 4 只大鼠随机分成两组，分别为超声组(Ultrasonic Group, USG)和自由恢复组(Free Recovery Group, FRG)，超声组(USG)对其照射与干预组(IG)相同条件的超声，照射部位相同，自由恢复组(FRG)不做任何处理。治疗阶段时间为 14 d，在第 15 d 处死，采血做生化指标(CK, BUM 和 MDA)检测。治疗阶段期间，每 2 d 测一次体重。

2 实验结果

实验结果分两个阶段，干预阶段和治疗阶段。每个阶段的实验数据为物理指标(体重)和生化指标(CK, BUM, CRE, MDA 和钙离子)。具体实验数据如下。

2.1 干预阶段实验数据

图 3 为干预阶段干预组(IG)、疲劳组(FG)和对照组(CG)的体重变化。

表 2 为干预阶段采集大鼠血液，血浆分离后血清中 CRE, CK, 钙离子和 BUN 的含量。

2.2 治疗阶段实验数据

表 3 为治疗阶段采集大鼠血液, 血浆分离后血清中 CK, BUN 和 MDA 的含量, 在杀鼠取血过程中由于自有恢复组(FRG)采血失败, 故没有生化指标。

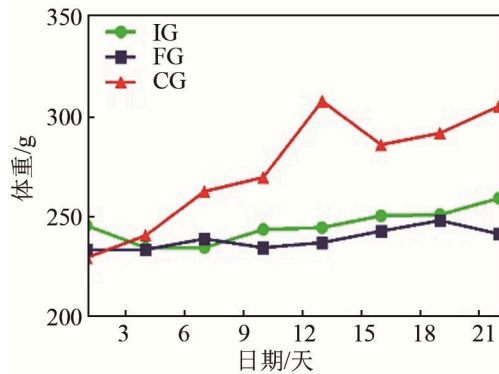


图 3 干预阶段干预组(IG)、疲劳组(FG)和对照组(CG)的体重变化
Fig.3 Weight changes of Intervention Group (IG), Fatigue Group (GP) and Control Group (CG) in the intervention phase

表 2 干预阶段生化指标测试

Table 2 Biochemical index test in intervention phase

组别	CRE $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	CK $\text{U}\cdot\text{mL}^{-1}$	钙离子 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	BUN $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$
IG	42.772	3.109	5.515	11.005
FG	49.366	2.848	5.217	13.995
CG	15.570	3.117	5.305	9.052

表 3 治疗阶段生化指标测试

Table 3 Biochemical index test in treatment phase

组别	CK $\text{U}\cdot\text{mL}^{-1}$	BUN $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	MDA $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$
USG	4.215	-0.113	38.091
CG	2.247	0.083	45.592

图 4 为治疗阶段超声组(USG)、自由恢复组(FRG)和对照组(CG)的体重变化情况。

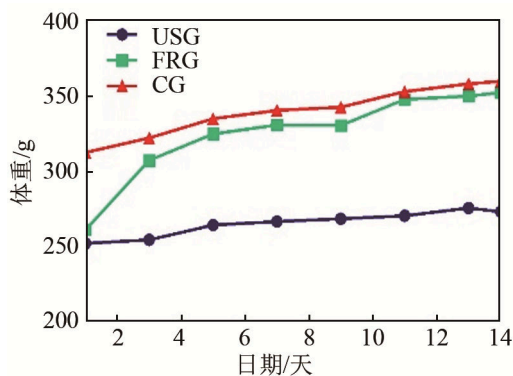


图 4 治疗阶段超声组(USG)、自由恢复组(FRG)和对照组(CG)的体重变化
Fig.4 Weight changes of Ultrasound Group (USG), Free Recovery Group (FRG) and Control Group (CG) in treatment phase

3 结果分析

3.1 干预阶段

对表 2 干预阶段的生化指标测试进行分析: 干预组(IG)的肌酐含量明显低于疲劳组(FG), 但仍然比对照组(CG)的含量高。肌酸激酶(CK)的含量值受时间的影响较大, 可能会出现疲劳组(FG)在 48 h 内小于对照组(CG)的情况, 超声干预组(IG)的 CK 值会上升。疲劳组(FG)的钙离子浓度比对照组(CG)有小范围的下降^[8]。干预组(IG)的血尿素氮含量低于疲劳组(FG), 但仍然比对照组(CG)高。

通过对图 3 干预阶段 IG、FG、CG 体重变化分析可知, 在干预阶段, 对照组(CG)的大鼠体重呈明显的上升趋势, 而干预组(IG)和疲劳组(FG)的体重上升缓慢, 干预组(IG)的体重比疲劳组(FG)的体重上升要平缓。

3.2 治疗阶段

对表 3 治疗阶段生化指标测试进行分析可知: MDA 反映了细胞的受损情况, MDA 含量越高, 生物膜受损越严重。就超声组(USG)来说, 其含量低于对照组(CG)。其余两个指标的数据与实验理论数据相差较大, 可能是因为在采血过程中出现了溶血情况。

对图 4 治疗阶段的 USG, SRG, CG 体重变化分析可知, 对照组的体重一直趋于上升阶段, 且始终比超声组(USG)和自由恢复组(FRG)要高, 自由恢复组(FRG)的体重在自由恢复阶段初期存在一个明显的骤升阶段, 而超声组(USG)始终缓慢增长, 且是三组中体重最低的一组。

4 结论

通过对整个实验的实验数据分析, 可以得出, 当超声强度在 $30 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$, 脉冲重复频率为 100 Hz, 占空比 20%, 中心频率为 1.5 MHz 时, 超声对疲劳的减缓和治疗都起到一定的促进作用。就本文而言, 干预阶段, 超声对缓解肌肉疲劳的作用更为明显。通过对物理生化指标的分析可以明确得出, 超声可以用来减缓和治疗疲劳。但具体的实验数据与所参考的文献存在差异, 推测可能是由于实验对象数量较少, 存在明显的个体差异, 实验过程不严谨所致。

参 考 文 献

- [1] TAVARES F, SMITH T B, DRILLER M. Fatigue and recovery in rugby: a review[J]. *Sports Medicine*, 2017, **47**(8): 1515-1530.
- [2] HEATON L E, DAVIS J K, RAWSON E S, et al. Selected in-season nutritional strategies to enhance recovery for team sport athletes: a practical overview[J]. *Sports Medicine*, 2017, **47**(11): 1-18.
- [3] 陈思颖. 低强度超声波与电磁场对改善运动后延迟性肌肉酸痛的作用研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
CHEN Siying. Effect of low intensity ultrasound and electromagnetic field on the improvement of delayed muscle soreness after exercise[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2016.
- [4] MAYR E, FRANKEL V H, RÜTER A. Ultrasound: an alternative healing method for nonunions[J]. *Archives of Orthopaedic & Trauma Surgery*, 2000, **120**(1-2): 1-8.
- [5] YANG Y H, HE C Q, YANG L, et al. Effects of different intensity pulsed electromagnetic fields on serum estradiol of ovariectomized rats[J]. *Journal of Sichuan University*, 2008, **39**(2):256.
- [6] 刘晓莉, 罗勇, 乔德才. 大鼠一次性力竭跑台运动模型的建立及动态评价[J]. *中国实验动物学报*, 2012, **20**(3): 25-28.
LIU Xiaoli, LUO Yong, QIAO Decai. Establishment and dynamic evaluation of a rat model of one single bout exhaustive exercise on treadmill[J]. *Acta Laboratorium Animalis Scientia Sinica*, 2012, **20**(3): 25-28.
- [7] BEDFORD T G, TIPTON C M, WILSON N C, et al. Maximum oxygen consumption of rats and its changes with various experimental procedures[J]. *Journal of Applied Physiology Respiratory Environmental & Exercise Physiology*, 1979, **47**(6): 1278.
- [8] 汶希, 潘华山, 冯毅翀. 大鼠运动性疲劳模型的建立[J]. *中国实验动物学报*, 2009, **17**(5): 368-372.
WEN Xi, PAN Huashan, FENG Yichong. Establishment of a rat model of exercise induced fatigue[J]. *Acta Laboratorium Animalis Scientia Sinica*, 2009, **17**(5): 368-372.

中国科学院声学研究所超声技术中心成功研制 新型声表面波电流传感器

经过近三年的科研攻关,中国科学院声学研究所超声技术中心王文课题组将快速响应的声表面波技术与高磁敏磁致伸缩薄膜技术相结合,成功研制出高灵敏、快速响应和低迟滞误差的新型电流传感器。2018年6月底,该技术作为国家电网公司基础前瞻性研究重点项目“面向电网应用的新型传感及储能电池关键技术研究”的关键产出成果,顺利通过专家验收。

王文课题组通过建立声表面波磁致伸缩效应的电流感知理论,实现了对沉积图形化磁致伸缩薄膜的新型声表面波电流传感器的物理结构优化,提取了获得高磁敏、快速响应与低磁滞的拓扑结构参数;给出了传感器微纳制作工艺方法,研制出了原型器件,测试结果很好地验证了分析理论,其灵敏度达到了22 kHz/A,分辨率可达0.1 mA以下,并体现出良好的线性度。相对于现有技术,声表面波电流传感器表现出了微型化、抗干扰能力强、线性度好、低功耗等优势,在智能电网线路检测、电力冶金与轨道交通中的供电安全预警与救援、工业自动化中的电源继电保护中极具应用前景。

本项目成果已经在《AIP Advances》,《Smart Mater. Struct.》,《Appl. Sci.》,《Sensors》以及《声学学报》等领域内高水平期刊上发表论文10余篇,也在2015年、2017年的IEEE国际超声会议上进行报道,受到国内外专家学者的广泛关注。此外,该项成果已经获授权发明专利1项,申请发明专利2项。