

双关节运动的局部肌肉疲劳与肌电变化*

吴 飞¹ 王 健¹

摘要 目的:以腕-肘关节为例,探讨不同水平运动负荷诱发尺侧腕屈肌(FCU)和肱二头肌(BB)疲劳过程中 sEMG 信号与各关节最大屈肌肌力的关系。方法:采集 10 名青年男性受试者在不同负荷水平(30%、55%、80%MVC)下疲劳过程中尺侧腕屈肌(FCU)和肱二头肌(BB)的表面肌电信号和各关节在疲劳前后的 MVC。结果:不同运动负荷强度分别诱发前臂和上臂肌肉疲劳过程中,腕、肘关节最大屈肌肌力明显下降且具有明显负荷强度效应;BB 和 FCU 的 MPF 与 MF 单调递减且下降率具有明显的负荷强度效应;不同负荷强度下 BB 和 FCU 的 MPF 和 MF 下降斜率与肘、腕关节最大屈肌肌力的下降比值之间有明显相关。结论:局部肌肉疲劳过程中 MPF 和 MF 下降率变化能够对相应关节最大肌力变化作出比较准确预测。

关键词 双关节运动;最大随意肌力;表面肌电信号;肌肉疲劳

中图分类号:R496,R749,R318 文献标识码:A 文章编号:1001-1242(2006)-01-0025-03

Local muscle fatigue and sEMG change in two-joint isometric flexion/WU Fei, WANG Jian//Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2006,21(1):25-27

Abstract Objective:To investigate the relationship between sEMG signal and force during fatiguing contractions in flexor carpi ulnaris muscle (FCU) and biceps brachii muscle (BB) respectively based on wrist and elbow flexions. **Method:**Ten young subjects performed isometric contractions at different load levels (30%,55%,80%MVC) and sEMG signal of FCU, BB and each joint MVCs before and after fatiguing contractions were recorded. **Result:**The MVCs of wrist flexion and elbow flexion decreased significantly after muscle fatigue progress in forearm and upper arm induced by different load level, and displayed marked load level effect. The mean power frequency(MPF) and median frequency (MF) of BB and FCU showed same varying pattern. There was significant correlation between MPF slope, MF slope and the force drop of BB, FCU at any level. **Conclusion:**The slope of MPF and MF during local muscle fatigue progress can be used to predict the corresponding joint muscle force changes.

Author's address Institute of Sports Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou, 310028

Key words two-joint isometric flexion; maximal voluntary contraction; surface electromyography; muscle fatigue

表面肌电 (surface electromyography, sEMG) 信号因其具有良好的局部性以及探测部位的肌肉收缩力和疲劳度等有密切关系,而被用于局部肌肉活动水平和功能状态的检测与评价,受到人机工程、康复医学和体育科学等领域研究的高度重视。目前研究表明,在单一关节水平范围内,sEMG 的多种信号活动特征与局部肌肉疲劳程度具有单调线性变化规律,主要表现为平均功率频率 (mean power frequency, MPF) 和信号复杂度 (signal complexity) 随着肌肉耐力负荷时间的延长单调下降,确定性线段百分比 (determinism%, DET%) 和平均肌电值 (averaged EMG, AEMG) 随着肌肉耐力负荷时间的延长增加^[1-3]。但在多关节活动范围内,控制不同关节的主要运动肌其疲劳程度是否与其 sEMG 信号活动特征之间具有类似的变化关系,尚不完全清楚。目前研究认为,中枢神经系统 (central nervous system, CNS) 对于单一肢体运动时不同肌肉活动的控制具有整体协调性,且不同肌肉的 MPF 具有类似的变化规律,

反映了 MPF 可能同时受到运动单位活动同步化和外周传导速度的共同影响。为此,本研究拟以腕-肘关节为例,探讨不同水平运动负荷诱发尺侧腕屈肌 (flexor carpi ulnaris, FCU) 和肱二头肌 (biceps brachii, BB) 疲劳过程中 sEMG 信号与各关节最大屈肌肌力的关系,为进一步探讨应用 sEMG 信号分析技术研究肌肉运动控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验对象

健康男性被试 10 名,年龄 23.5 ± 3.9 岁,身高 173.9 ± 7.5 cm,体重 66.6 ± 6.9 kg,前臂皮脂厚度 4.1 ± 1.0 cm,上臂皮脂厚度 3.7 ± 0.8 cm,前臂围度 $26.0 \pm$

* 基金项目:国家自然科学基金项目(30170447);中国-芬兰政府间科技合作项目(AM1021)

1 浙江大学体育科学与技术研究所,杭州,310028

作者简介:吴飞,男,硕士研究生

收稿日期:2005-09-11

1.3cm,上臂围度 26.3 ± 1.3 cm。被试身体健康且无上肢损伤或疾病,实验前 24h 内均无剧烈运动。

1.2 负荷方案

1.2.1 标准动作姿势: 被试面向实验台,坐在高约 90cm 的实验台前,上体直立,前臂和上臂、上臂和躯干分别保持 90° ,前臂外旋,掌心面向被试,腕关节维持 180° 。

1.2.2 最大随意肌力 (maximal voluntary contraction, MVC) 的测量: 所有 MVC 测量都在标准姿势下完成,每人 3 次,中间间隔 2min,取最大值作为 MVC。MVC 测量包括腕关节屈肌、肘关节屈肌和腕-肘联合用力肌力。测试过程中,主试始终大声激励被试。

1.2.3 静态运动负荷方案: 负荷强度分为 30% MVC、55%MVC 和 80%MVC 三个水平,同一负荷强度的疲劳试验进行 2 次,以分别检测在此条件下的腕、肘关节最大屈肌肌力变化。计算不同负荷水平下腕、肘关节最大屈肌肌力下降比值,以此代表前臂和上臂屈肌疲劳度。

最大屈肌肌力下降比值=(初值-末值)/初值

1.3 肌电信号的采集

双电极法采集尺侧腕屈肌(flexor carpi ulnaris, FCU)和肱二头肌(biceps brachii, BB)信号,电极直径 0.5cm,间距 2cm,置于肌腹处且与肌纤维走向平行,参考电极位于内侧 3cm,电极位置参考 MEGA 系统图谱。sEMG 信号的采集采用 ME6000 肌电仪(芬兰 MEGA 公司产品),采样频率 1000Hz,输入阻抗小于 $10G\Omega$,差分放大器的放大倍数是 1000 倍,CMRR >100 dB,噪声水平小于 $1\mu V$,A/D 转换 12bit。

1.4 统计学分析

采用单因素方差分析检验负荷水平对肘关节和腕关节屈肌肌力下降比值以及 BB 和 FCU 的 MPF 和 MF 斜率的影响;采用相关分析,计算不同运动负荷强度下肘关节和腕关节屈肌肌力下降比值与 BB 和 FCU 的 MPF 和 MF 下降斜率的关系。

2 结果

肘、腕关节疲劳试验过程中,肘、腕关节的肌力下降比值随相对运动负荷水平增加而下降,单因素方差分析显示,负荷水平对 BB 肌力下降存在显著影响,而负荷对 FCU 肌力无显著影响(图 1、表 1)。

肘、腕关节疲劳试验过程中,BB 和 FCU 的 MF 和 MPF 的下降斜率随相对运动负荷水平增大而下降,单因素方差分析显示负荷水平对 BB 和 FCU 的 MF 和 MPF 的下降率均存在显著影响(图 2、表 1)。

分别在不同运动负荷水平下,将最大肘关节和腕关节屈肌肌力的下降比值与各自对应肌肉的 MF 和 MPF 下降斜率进行相关分析,未见明显统计相关;但是,若针对全部运动负荷试验进行相关分析,则 BB 和 FCU 的 MPF 和 MF 下降率与肌力下降率明显相关(表 2)。

图 1 不同负荷水平下肌力的下降比变化

图 2 不同负荷水平下 MF、MPF 斜率变化图

表 1 负荷水平对肌力下降率以及 MPF 和 MF 影响的单因素方差分析

	FCU			BB		
	肌力下降率	MF下降率	MPF下降率	肌力下降率	MF下降率	MPF下降率
F	2.621	5.538	12.169	3.398	49.500	38.368
P	0.091	0.010	0.000	0.048	0.000	0.000

表 2 肘关节和腕关节力的下降比与各自对应屈肌的 MF 和 MPF 下降斜率的相关分析

	FCU		BB	
	MF下降斜率	MPF下降斜率	MF下降斜率	MPF下降斜率
30%MVC	-0.391	-0.539	-0.141	-0.141
P	0.264	0.108	0.697	0.698
55%MVC	0.159	0.124	0.251	0.110
P	0.661	0.733	0.484	0.762
80%MVC	0.493	0.485	-0.122	-0.112
P	0.148	0.155	0.737	0.757
全程	0.361	0.371	0.398	0.378
P	0.050 ^①	0.043 ^①	0.029 ^①	0.039 ^①

①在 0.05 水平相关

3 讨论

以往研究多以定量运动负荷强度条件下肌肉耐受运动的持续时间来考察和评价局部肌肉疲劳程度,而未见直接以有关肌肉最大随意收缩力这一标

准指标来实施评价并检验 sEMG 应用效度的研究。本研究通过特殊设计的双关节运动负荷装置, 以腕、肘关节屈肌的最大肌力下降作为肌肉疲劳的标准指标, 以不同运动负荷强度下 BB 和 FCU 的 MPF 与 MF 下降率作为观察指标, 研究发现不同运动负荷强度分别诱发前臂和上臂肌肉疲劳过程中, 腕、肘关节最大屈肌肌力明显下降且具有明显负荷强度效应, BB 和 FCU 的 MPF 与 MF 单调递减且下降率具有明显的负荷强度效应, 不同负荷强度下 BB 和 FCU 的 MPF 与 MF 下降率与肘、腕关节最大屈肌肌力的下降比值之间有明显统计相关。因此, 直接以 MPF 和 MF 下降率尚能够比较准确地预测局部肌肉疲劳的程度。

本研究在不同运动负荷强度疲劳试验条件下观察到的 MPF 和 MF 下降率变化规律与以往研究结果相同, 但与以往以肌肉耐力运动时间考察肌肉疲劳度不同, 本研究直接以反映局部肌肉疲劳的直接指标最大随意收缩力考察肌肉疲劳度, 发现 BB 和 FCU 的 MPF 与 MF 下降率与各自运动负荷条件下肘、腕关节最大屈肌肌力的下降比值之间没有明显统计相关。对于该实验结果, 本研究初步分析可能有以下两方面原因, ①被试在完成最大随意屈腕过程中, FCU 的贡献率较小且与由全部腕屈肌活动共同决定的最大随意屈腕力变化之间缺乏较好的一致性^[4]; ②MPF 和 MF 除了受外周肌肉代谢性酸中毒影响外, 还进一步受到由 CNS 控制的运动单位活动同步化程度的影响, 而后者在许多研究中都显示出具有整体一致性的变化特点。例如, 王健等、杨基海等先前的研究均发现, 在单关节疲劳性运动条件下, 主动肌与拮抗肌 sEMG 信号的 MPF 具有类似的变化规律, 而此刻的拮抗肌并未产生疲劳^[5-7]。Masuda 等通过对受试者完成 50% MVC 动态和静态膝关节运动负荷时肌纤维传导速度 (muscle fibre conduction velocity, MFCV) 和 MF 变化的关系研究, 发现由 MFCV 下降造成的 MF 下降比例只占总下降率的 7%^[8]。此外, 还有更多的研究发现肌肉疲劳过程中 MFCV 的变化率远不及 sEMG 频谱左移变化率^[9-12]; 运动后恢复期 MPF 的半恢复时明显快于 MFCV^[13-15]。这些研究结果均无法以传统的 MFCV 下降观点加以合理解释。目前, 生理学就 MFCV 和运动单位 (motor unit, MU) 同步化对 MPF 和 MF 改变的作用尚无有效方法加以区分和定量, 虽然以往有人认为 10—40 Hz 频段功率增加与 MU 同步化增强有关, 但 Hagg 等学者认为由于参与活动的 MU 数量众多, 其作用尚不足以引起 sEMG 信号功以及 MPF 或者 MF 的改变。对此, 尚需

要进一步的研究。

4 结论

不同强度的双关节疲劳性运动负荷试验过程中腕、肘关节最大屈肌肌力明显下降且具有明显负荷强度效应; 不同强度的双关节疲劳性运动负荷试验过程中 BB 和 FCU 的 MPF 与 MF 单调递减且下降率具有明显的负荷强度效应; 不同负荷强度疲劳性运动条件下 BB 和 FCU 的 MPF 与 MF 下降率与肘、腕关节最大屈肌肌力的下降比值间呈明显相关。

参考文献

- [1] Biodeau M, Cincera M, Gervais S, et al. Changes in the Electromyographic spectrum power distribution caused by a progressive increase in the force level [J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1995, 71: 113—123.
- [2] Moritani T, Muro M, Nagata A, et al. Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle Fatigue [J]. J Appl Physiol, 1986, 60: 1179—1185.
- [3] Webber CL J, Schmidt MA, Walsh JM. Influence of isometric loading on biceps EMG dynamics as assessed by linear and non-linear tools [J]. J Appl Physiol, 1995, 78: 814—822.
- [4] Roger V Gonzalez, Thomas S Buchanan, Scott L Delp. How muscle architecture and moment arms affect wrist flexion-extension moments [J]. J Biomechanics, 1997, 30(7): 705—712.
- [5] 王健, 杨红春, 刘加海. 疲劳相关表面肌电信号特征的非疲劳特异性研究 [J]. 航天医学与医学工程, 2004, 17(1): 39—43.
- [6] 杨基海, 孙路遥. 主动肌和拮抗肌的针电极 EMG 信号中值频率关系研究 [J]. 生物物理学报, 1998, 14(1): 189.
- [7] 陈香, 杨基海, 姜智, 等. 拮抗肌对运动单位平均发放率的变化关系研究 [J]. 生物医学工程学报, 2002, 19(30): 463—466.
- [8] Masuda K, Masuda T, Sadoyama T, et al. Changes in Surface EMG parameters during static and dynamic fatiguing contractions [J]. Journal of Electromyography and Kinesiology, 1999, 9(1): 39—46.
- [9] Broman H, Bilotto G, De Luca CJ. Myoelectric Signals Conduction velocity and spectral parameters: influence of force and time [J]. J Appl Physiol, 1985, 58: 1428—1437.
- [10] Linssen WHJP, Stegeman DF, Joosten EMG, et al. Variability and interrelationship of surface EMG parameters during local muscle fatigue [J]. Muscle Nerve, 1993, 16: 849—856.
- [11] Rainoldi A, Galardi G, Maderna L, et al. Repeatability of Surface EMG variables during voluntary isometric contraction of Biceps Brachii [J]. J Electromyogr Kinesiol, 1999, 9: 105—119.
- [12] M. Lowery a, P. Nolan b, Malley MO. Electromyogram median frequency, spectral compression and muscle fiber conduction velocity during sustained sub-maximal contraction of the brachioradialis muscle [J]. J Electromyogr Kinesiol, 2002, 12: 111—118.
- [13] Zwarts MJ, Weerden TW Van, Haenen HT. Relationship between average muscle fibre conduction velocity and EMG power spectra during isometric contraction, recovery and applied ischemia [J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1987, 56(2): 212—216.
- [14] Sakamoto K, Mito K. Muscle fiber conduction velocity during isometric contraction and the recovery period [J]. Electromyogr Clin Neurophysiol, 2000, 40(3): 151—161.
- [15] Van der Hoeven JH, Lange F. Supernormal muscle fiber conduction velocity during intermittent isometric exercise in human muscle [J]. J Appl Physiol, 1994, 77: 802—806.