

运动性肌肉疲劳的肌电图特征及其机制探讨

Characteristics on EMG during Exercise-induced Muscle Fatigue and Arguments of its Mechanism

袁爱国¹, 史绍蓉¹, 何彩艳², 袁小林³, 龙群芳⁴

Yuan Ai-guo¹, SHI Saho-rong¹, HE Cai-yun², et al

摘要: 本文通过文献综述法简要总结了运动导致肌肉疲劳的表面肌电图特征, 介绍了表面肌电图主要测量指标及其影响因素, 同时对指标的特异性做了小结: MPF 对于反映肌肉疲劳较 MF 更具敏感性; MPF 在反映肌肉功能水平差异方面具有良好的特异性和敏感性; IEMG 则是反映肌肉随时间而延长出现疲劳的 1 个良好指标。并对可能导致表面肌电图特征改变的机制进行了探讨, 最后对其应用在肌肉疲劳领域的前景进行了展望。

关键词: 运动性肌肉疲劳; 表面肌电图; 特征; 机制

Abstract: This article chiefly summarizes the SEMG characteristics of exercise-induced muscle fatigue by literature summary. Introducing the main indices of SEMG and its influential factors, and summarizes theirs' specific characters, finds out MPF is more sensitive than MF; MPF is also good at reflecting the discrimination of function level of muscle; IEMG is a good one on muscle fatigue along time prolonging and leads an argument about those may cause the changes of the characteristics of SEMG And previews its prospect of its avail in muscle fatigue area at last.

Keywords: Exercise-induced muscle fatigue; Surface EMG; Character; Characteristic; Mechanism

中图分类号: G804.5 **文献标识码:** A

运动性肌肉疲劳特指运动引起肌肉产生最大随意收缩力量或输出功率暂时性下降的生理现象^[1]。其发生机制极其复杂, 涉及中枢运动驱动、神经肌肉接头兴奋——收缩耦联和肌肉能量代谢等多种生理过程^[2-4]。近年来, 随着肌电图技术的发展, 利用 EMG 记录、研究肌肉疲劳也成为生理学中越来越常用的方法。EMG 技术具有非损伤性、实时性、多靶点测量等优点^[5]。对 EMG 的研究可揭示肌肉疲劳的机制; 在运动实践中判断疲劳, 指导训练; 尤其适用于测量运动时的肌电变化, 现已逐渐应用于体育科研的许多方面^[6]。

1 历史回顾

早在 1666 年, 法朗西斯科·瑞迪就发现肌肉能产生电活动, 19 世纪末就有肌电图用于研究的报道。1922 年爱兰格 (Blanser) 用阴极射线示波器装置了肌电图机, 为肌电图法奠定了基础。但早期的表面肌电图仪记录电流时常常

受周围电场、声波等的干扰, 需要在镀铜的屏蔽罩内进行工作, 在多数情况下, 肌电图仅作定性分析, 大大限制了肌电图的应用。随着 20 世纪 30~60 年代针式肌电图的迅速发展, 出现了表面肌电图, 因 SEMG 检测具有非损伤性、实时性、多靶点测量等优点, 已逐渐成为目前研究的热门手段。20 世纪 70 年代以后, 由于计算机的广泛应用, 伴随着肌电图信息管理系统的开发^[7]、WIN98 环境下肌电图信号高速采样的实现^[8]、生物医学工程的发展^[9]、表面肌电图

收稿日期: 2006-02-15

作者单位: 1. 湖南师范大学体育学院, 湖南 长沙 410083;

2. 洞口县九峰完小, 湖南 洞口 422314;

3. 洞口县金田中学, 湖南 洞口 422314;

4. 洞口县太平中学, 湖南 洞口 422314

1. P. E. Department of Hunan Normal University, Hunan Changsha, 410083, China; 2. Jiufeng Primary School in Dongkou, Hunan Dongkou, 422314, China; 3. Jintain middle School in Dongkou, Hunan Dongkou, 422314, China; 4. Taiping Middle School, Hunan Dongkou, 422314, China.

仪自身技术的不断改进, 对肌电图的定量分析越来越普遍, 肌电技术迎来了其发展的第 2 个春天, 开始广泛地应用于体育科研、医学临床诊断等方面, 并逐渐普及。

2 运动肌电图常用的测量指标及测量意义

肌电图信号的分析主要包括时域和频域分析, 肌电的时域分析能为我们提供电极下各类肌纤维的放电时间、放电总量、放电的频率、放电振幅等, 特别是在运动技术动作分析上有它的独到之处^[10]。而肌电频域分析可为我们提供以下几方面的信息: 可知某种频率放电能量的集中趋势、不同类型肌纤维的动员情况、神经肌肉功能状态的改变与放电频率变化间的关系。而对于阐明神经、肌肉的工作机理和机能状态, 最理想的应是同时应用时域与频域分析, 特别是后者^[11]。

2.1 时间域

时间域是指可以在时间维度上反映肌电曲线的变化特征的评价指标, 主要指标有积分肌电 (IEMG)、均方根振幅 (RMS)、平均振幅 (MA) 等。

积分肌电 (IEMG): IEMG 是指所得肌电信号经整流滤波求单位时间内曲线下面积的总和, 表示在一定时间内肌肉中参与活动的运动单位放电总量, 它可反映肌电信号随时间进行的强弱变化, 是评价疲劳的重要手段。

均方根振幅 (RMS): 用来描述一段时间内肌电的平均变化特征, 指此段时间内所有振幅的均方根值。一般认为与运动单位募集和兴奋节律的同步化有关。

平均振幅 (MA): 反映肌肉电信号的强度与参与的运动单位数目及放电频率同步化程度有关, 它提示一定时间内肌肉放电的平均水平。

2.2 频率域

频率域分析是指在频率方面评价肌电信号的指标分析, 频域信号是时将域信号通过快速傅里叶转换 (FFT) 得出的, 在表面肌电信号的检测与分析中具有重要的应用价值。频域分析主要指标有平均功率频率 (MPF)、中值频率 (MF)、时间与 MPF 曲线的斜率 (MPFslope) 和时间与 MF 曲线的斜率 (Mfslope) 等。

平均功率频率 (MPF): 表示的是过功率谱曲线重心的频率。MPF 较稳定, 对于低负荷条件下的频谱变化有高度敏感性^[9]。

中值频率 (MF): 中值频率是指骨骼肌收缩过程中肌纤维放电频率的中间值。MF 抗噪声干扰性强, 适应的负荷水平范围较广, 在各类肌肉及各种收缩中都随力的增加而增加^[12]。

MPFslope 和 Mfslope: 表示时间与 MPF 和 MF 曲线的斜率, 代表运动过程中 MPF 或 MF 的相对变化。

3 运动性肌肉疲劳的 EMG 特征

肌肉运动包含着神经肌肉系统一系列复杂的生物电活动, 运动的方式、强度、时间、性质、肌肉的选择、肌肉的收缩方式、受试者的身体素质、采集肌电信号的仪器设备、提取特征量所用的计算方法、电极的安放位置及间距等都会影响运动性肌肉疲劳 EMG 的改变。这些都是在目前众多有关运动性 EMG 特征的研究中, 导致研究结果存在有较大差异的主要原因。

3.1 等长收缩

扬丹等^[13]观察了等长负荷中肱二头肌疲劳的 EMG 变化的特点, 发现时域指标 IEMG 和均方根振幅 (RMS) 的时间序列曲线并非呈特异性的直线递增, 频域指标平均功率频率 (MPF) 和中值频率 (MF) 的时间序列曲线均无一例外的呈显著的直线递减型变化。这可能是疲劳产生后, 由于肌肉内乳酸大量堆积导致肌传导速度下降所致。说明频域指标 (MPF 和 MF) 时间序列曲线的斜率与负荷持续时间明显相关, 而时域指标 (IEMG 和 RMS) 的相关不明显, 进而说明 sEMG 频域指标反映肌肉疲劳的效果优于时域指标。

在静力性工作状态下, 比较一致的结论是: 由于初始态到疲劳态 IEMG 的振幅值随疲劳程度的加深而增加, 频域值功率谱向低频方向转移。并且封飞虎等^[14]的研究还明确地获得了频率降低的具体范围, 他们得出最大谱峰对应频率左移值为 (9-18Hz)。除了可能是骨骼肌收缩过程中快慢肌纤维成分募集形式改变引起之外^[15], 还有可能是由于肌肉组织内 pH 值升高引起肌细胞膜电位超极化, 导致细胞内的 K^+ 外流, 而 K^+ 外流又会对细胞膜电位超极化产生阻滞, 使肌细胞兴奋性下降、肌纤维传导速度降低, 从而导致了肌肉放电频率向低频带转移^[16]。但我们认为也不排除这种可能: 根据目前研究, 肌肉组织具有低通滤波器的作用^[17]。肌肉收缩时, 肌肉的长度缩短, 厚度增加, 记录电极与活动运动单位之间的距离增加, 从而导致部分高频信号被滤除, 低频信号比例增加, 导致频谱低移^[18]。

3.2 离心收缩和向心收缩

王瑞元等^[19]研究了 12 名男大学生 (22~24 岁) 极限负荷斜蹲过程中 (可分为离心、等长和向心收缩阶段) 股外侧肌肌电信号的变化特点, 发现 IEMG 在各阶段随时间增高, 在等长阶段和向心收缩阶段高于离心阶段。说明 IEMG 在等长收缩和向心收缩阶段对股外侧肌电信号变化的特异性优于离心收缩阶段。Kroon 等^[20]通过比较 50% 和 40%MVC 负荷下等长收缩、离心收缩和向心收缩至力竭的屈肘肌的 EMG 改变的特点, 发现 3 种性质工作的 IEMG、RMS 随时间增加, MPF 随时间下降。但离心收缩 RMS 和 MPF 的改变率比其他 2 种工作为高 ($P<0.01$)。这有可能是

由于肌肉能量代谢失衡和局部酸性代谢产物的增加使肌纤维的内环境发生不断改变,从而导致某些运动肌纤维收缩力量下降,为了维持原来的肌张力,募集新的运动单位开始放电。

3.3 等动收缩

邱龙潜等^[21]在观察了肱二头肌在等速运动负荷下工作至力竭时的 SEMG 特征,发现时域指标 IEMG 和均方根振幅(RMS)虽在疲劳过程中系数也呈递增性变化,但它们的时间序列曲线变化类型缺乏较好的一致性;而频域指标中的平均功率频率(MPF)明显下降,并且时间序列曲线呈典型的单调递增趋势,但也与 MF 的时间序列曲线的变化类型缺乏较好的一致性。与杨丹等^[22]的研究发现基本一致。说明 MPF 在反映肌肉功能水平差异方面具有良好的特异性和敏感性。杨晓晔^[23]等研究发现:在肌肉运动到疲劳时,IEMG 达到最大值,这说明 IEMG 对反映肌肉随运动时间延长而出现疲劳方面具有良好的特异性。

Geldie 等^[24]采用等动伸膝作为运动形式,记录了完成 70 次最大等动伸膝过程中股四头肌 EMG 的变化,发现在最初的 40 次收缩阶段 MPF 陡然下降,而后下降率有所降低;与 Wretling 等^[25]的研究发现基本一致。这可能是由于疲劳产生后,运动单位电位叠加而使频率增加缓慢或停止所致。而 Vandieen^[26]研究了髂棘肌以 25%和 50%MVC 为负荷进行等动收缩时,肌肉疲劳与肌电改变的关系发现:肌电的频谱改变与肌肉疲劳之间没有相关性。这可能与采用的测量方法有关,即其可靠程度还需要更进一步研究验证。

4 运动性肌肉疲劳 EMG 改变的机制

关于运动性肌肉疲劳 EMG 改变的机制,目前已经有如下一些推测:

(1) 因快运动单位很快疲劳而募集更多的未疲劳的慢运动单位参加工作;

(2) 疲劳时为了维持肌肉应达到的张力而加强运动单位兴奋的同步化;

(3) 肌肉收缩时血流受阻,使肌肉乳酸积累,导致运动单位传导速度降低;

(4) 肌肉疲劳时肌内压升高,使血流受阻,引起肌膜兴奋,传导速度降低等^[27]。

并且可能还有新的推测出现,但总的来说,可将目前的研究归纳为 2 个方面:中枢机制和外周机制。本文也只会从以下几个有限的方面进行探讨。

4.1 中枢机制

中枢机制主要是指大脑皮层运动中枢的激活水平或中枢驱动以及运动神经元的兴奋发放频率及其同步化程度等

对肌电信号变化的作用途径和方式。Kent-Braun 等^[28]分别使用 sEMG 和电刺激对静态运动负荷诱发肌肉疲劳过程中中枢和外周因素的作用进行了定量研究。研究发现:当受试者完成维持 4min 的最大静态运动负荷后,MVC 下降到运动初期的 22%,最大电刺激肌力下降到运动初期的 37.3%,与此同时,中枢激活比值(CAR)由运动初期的 0.94 下降到 0.78,MVC/强直肌力比值由 2.34 下降到 1.25,iEMG/CMAP 比值由 3.29 下降到 0.74,这些结果初步证明了中枢作用机制的存在。此外,他们还通过计算得出中枢机制在整个肌肉疲劳中的作用占到 20%,该结果是当前针对中枢机制进行定量评价的唯一报道。另外,直接测定人体肌肉运动初期至极度疲劳过程中运动单位放电频率(MUFR)也发现,其数值由 100Hz 降至约 20Hz 水平,初步表明兴奋发放频率可能是中枢机制的 1 种。

4.2 外周机制

对于外周机制,目前认为主要与以下 2 个方面有关:代谢性酸中毒和钾离子。

4.2.1 代谢性酸中毒 以 Lindstrom 等^[29]为代表的“外周代谢机制”观点认为:外周肌肉代谢性酸中毒引起的肌细胞 MFCV 下降、动作电位波形变化是造成 SMEG 信号时频特征变化的主要原因。目前,该观点的主要支持证据是肌肉疲劳过程中 MPF 和肌纤维兴奋传导速度(MFCV)的变化具有高度的数据关联,但这种关联是否具有因果关系目前尚不完全清楚,所以,关于这方面的研究,争议较大。不同意此观点的人认为:一方面,就目前关于物质跨膜运动研究所获得的理论而言,肌乳酸盐跨膜外流的速率低于 H^+ ,故肌乳酸累积本身难以成为肌细胞代谢性酸中毒的证据;另一方面,有关 MPF 下降与细胞内 PH 变化相关性的研究也不支持上述观点。此外,还有一些研究发现,肌电变化与细胞内酸化失耦联,从而不支持 Lindstrom 的观点。如 Wdes 等^[30]发现:磷酸化酶缺乏,不能产生乳酸的肌病患者运动至疲劳时同样产生 EMG 频谱左移现象。这些说明代谢性酸中毒不是造成 SEMG 信号变化的原因,至少目前的研究认为不是主要原因,对于这方面合理的解释,还有待于更深入的研究。

4.2.2 钾离子 钾离子是肌细胞内的 1 种重要阳离子,在维持细胞膜电位的稳定和动作电位大小方面发挥重要作用。大量研究发现并证实:运动性肌肉疲劳过程中,肌肉细胞内 K^+ 含量减少,而细胞外液 K^+ 含量增加。体外实验研究表明:当细胞内 K^+ 从 187mmol 降到 134mmol,肌细胞膜电位就从 -75mv 降至 -57mv,说明细胞外高 K^+ 可降低动作电位幅度,减慢兴奋传导速度,导致肌电功率谱变化。何伟等^[31]的研究发现细胞外高 K^+ 导致活动肌 EMG 的 MPF 下降,支持肌肉疲劳时的细胞外高 K^+ 影响 EMG 变化的推

测。我们认为虽然 H^+ 不直接参与动作电位的形成, 但可能由于乳酸改变细胞内外的酸碱环境, 通过影响半透膜通透性而改变膜内外 Na^+ 、 K^+ 的浓度, 从而间接地对动作电位产生影响所致。

5 小 结

频域指标 MPF 的下降能有效地反映腰部肌肉功能状态的变化, 而时域指标 RMS 则没有这种特异性; MPF 对于反映肌肉疲劳较 MF 更具敏感性; 频域指标 MPF 在反映肌肉功能水平差异方面具有良好的特异性和敏感性; 频域指标 MPF 反映等速运动负荷诱发肱二头肌疲劳的特异性优于 IEMG、RMS、MF。时域指标 IEMG 对肱二头肌在等动性收缩中所引起的 EMG 变化有良好的特异性, 其特异性优于 RMS; IEMG 是反映肌肉随时间而延长出现疲劳的 1 个良好指标。

参考文献:

- [1] RAINOLDI A, MELCHIORRIG, CARUSO I. A Method for Positioning Electrodes during Surface EMG Recording in Lower Limb Muscles[J]. J Neuroscience Methods, 2004, 134: 37~43.
- [2] 邓树勋, 王 健. 高级运动生理学: 基础与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [3] NYBOA L, NIELS H S. Cerebral Perturbations Provoked by Prolonged Exercises[J]. Progress in Neurobiology, 2004, 72: 223~261.
- [4] ALLEN D J, WESTERBLAD H. Role of Phosphate and Calcium Stores in Muscle Fatigue[J]. J Physiology, 2001, 536 (3): 657~665.
- [5] Hgg G M, Luttmann A, JgerM1 Method ologies for evaluating electromyographic field data in ergonomics[J]. Journal Electromyography and Kinesiology, 2000, 10 (5): 301~312.
- [6] 王 健, 金小刚. 表面肌电信号分析及其应用研究[J]. 中国体育科技, 2000, 36 (8): 26~28.
- [7] 张 强, 蔡 铮, 等. 肌电图信息管理系统开发及临床应用[J]. 中国医疗器械杂志, 2002, 26 (3): 192~195.
- [8] 罗琦琨, 张庆陵, 等. WIN98 环境下肌电图信号高速采样的实现[J]. 上海生物医学工程, 2002, 23 (1): 49~52.
- [9] 王笃明, 王 健, 葛列众. 肌内疲劳的 sEMG 时频分析技术及其在工效学中的应用[J]. 航天医学与医学工程, 2003, 16(5): 26~28.
- [10] 罗小兵, 马 建. 肌电图在运动性肌肉疲劳研究中的应用现状[J]. 成都体育学院学报, 1999, 25 (4): 36~38.
- [11] 崔玉鹏, 洪 峰. 表面肌电图在人体运动研究中的应用[J]. 首都体育学院学报, 2005, (1): 31~35.
- [12] 王 奎, 刘建红, 宋 刚. sEMG 技术在评价运动性疲劳方面的方法及应用[J]. 安徽体育科学, 2004, 25 (3): 45~48.
- [13] 杨 丹. 等长负荷诱发肱二头肌疲劳过程中 SEMG 变化[J]. 体育与科学, 2000, (21): 27~35.

- [14] 封飞虎, 黄瑞馨. 疲劳前后肌电图的频域特征[J]. 上海体育学院学报, 1996, 20 (1): 51~54.
- [15] 王国祥, 李长宏. 肘关节等速运动过程中表面肌电图的变化特征[J]. 中国临床康复, 2004, 8 (12): 28~31.
- [16] Bouissou P, Estrade PY, Goubel F, et al. Surface EMG power spectrum and intramuscular Ph in human vastus lateralis muscle during dynamics exercise. J Appl Physiol 1989; 68 (3): 1245~1249.
- [17] 余洪俊. 表面肌电图评价肌肉的功能状况[J]. 中国临床康复, 2002, 23 (6): 36~41.
- [18] 王瑞元, 卢鼎厚. 极限负荷斜蹲过程中股外肌肌电信号变化及针刺和静力牵张对其恢复过程的影响[J]. 北京体育学院学报, 1991, (3): 29~36.
- [19] Kroon G W, Naeije M. Recovery of the human biceps EMG after heavy assentric concentric or isometric exercise[J]. Eur J Appl Physiol, 1991, 63 (6): 444~448.
- [20] 邱龙潜, 李 野, 等. 速负荷诱发肱二头肌疲劳过程中 SEMG 信号变化[J]. 温州大学学报, 2003, (9): 52~54.
- [21] 杨 丹, 王 健. 等速运动负荷诱发肱二头肌疲劳过程中 SEMG 变化[J]. 中国体育科技, 2002, 38 (4): 48~52.
- [22] 杨晓晔, 熊开宇. 积分肌电对青年男子股四头肌的疲劳评价[J]. 沈阳体育学院学报, 2004, 23 (3): 22~26.
- [23] Gerdle B, Elert J. The temporal occurrence of the MPF shift of the EMG during maximum prolonged dynamic and static working cycles[J]. Int J Sport Med, 1994, 15 (suppl.1): S32~37.
- [24] Wretling M L, Henriksson-larsen K, Gerdle B. Inter-relationship between muscle morphology, merchanical output and EMG activity during fatiguing[J]. Eur J Appl Physiol, 1997, 76 (6): 483~490.
- [25] Van Dieen J H, Boke B, Oosterhuis W et al. The influence of torpue and velocity on erector spunae muscle fatiue and its relationship to change of EMG spectrum density[J]. Eur J Appl Physiol, 1996, 72 (4): 310~315.
- [26] 王 健, 方红光, 杨红春. 运动性肌肉疲劳的表面肌电非线性信号特征[J]. 体育科学, 2005, 25 (5): 51~56.
- [27] KENT-BRAUJA. Central-and-peripheral-contributions-to-muscle-fatigue-in-humans-during-sustained-maxima 1-effort [J]. Eur, J, ApplPhysiol, 1999, 80: 57~63.
- [28] LindstrojL, Magnuss on S, PetersolI. Muscular fatigue and action potential conduction velocity changes studied with frequency analysis of EMG signals[J]. Electromyography, 1970, 10 (4): 341~354.
- [29] 王国祥. 不同负荷强度运动时表面肌电图中位频率与血乳酸浓度变化的关系[J]. 体育学刊, 2004, 11 (1): 42~46.
- [30] WILESC. -Fatigue-in-human-metabolic-myopathy[M]. In: human-muscle-fatigue: Physiological-mechanisms, edited-by-R. Port-eandJ. Whelan. London: Pitman, P. 1981. 264~282.
- [31] 何 伟, 王绵珍, 王治明. 运动所致血浆 K^+ 和血 pH 的变化对肌肉疲劳和表面肌电图的影响[J]. 四川大学学报 (医学版), 2005, 36 (1): 112~114.