

· 运动人体科学 ·

随意运动与电刺激诱发胫骨前肌疲劳 过程中肌电图的变化特征

王国祥, 岳春林

(苏州大学 体育学院, 江苏 苏州 215021)

摘 要: 为了解肌肉疲劳时神经肌肉系统兴奋性的变化规律, 以 10 名健康男子为对象, 采用随意性最大的肌肉收缩 (V 组) 和电刺激诱发肌肉收缩 (E 组) 的两种运动形式, 对足背屈运动引起胫骨前肌疲劳时的胫骨前肌和比目鱼肌的表面肌电图 (sEMG) 和诱发肌电图 (evoked EMG) 进行了观察。结果发现: (1) V 组和 E 组的 sEMG 积分值和平均频率均出现了降低的趋势, 而且 E 组的变化较为明显; (2) E 组的胫骨前肌 (主动肌) M_{\max} 和 H/M_{\max} 明显降低下, 比目鱼肌 (拮抗肌) M_{\max} 和 H/M_{\max} 在胫骨前肌疲劳后则无明显变化; (3) V 组胫骨前肌与比目鱼肌的 H/M_{\max} 在疲劳发生后均表现出显著低下, 但二者的 M_{\max} 却无明显变化。结论: 肌疲劳时不但主动肌脊髓运动神经元受到了抑制, 拮抗肌脊髓运动神经元也受到了类似的影响, 但由于肌肉收缩方式不同而上述变化并不完全一致。

关 键 词: 随意运动; 电刺激; 疲劳; 表面肌电图; 诱发肌电图

中图分类号: G804.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-7116(2007)01-0056-04

Characteristics of changes of electromyogram in the process of tibial anterior muscle figure caused by voluntary motion and induced by electric stimulation

WANG Guo-xiang, YUE Chun-lin

(College of Physical Education Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: In order to gain an insight into the pattern of changes of excitability of the neuro-muscular system, the authors based their object on 10 healthy males and applied two types of motion forms, namely, muscular contraction with maximum voluntary degree (group V) and muscular contraction induced by electric stimulation (group I), to observe the superficial electromyogram (sEMG) and induced electromyogram (iEMG) of tibial anterior muscle and soleus muscle when tibial anterior muscle fatigued as a result of ankle joint dorsal flexion, and revealed the following findings: 1) a decreasing trend occurred to the integral quantity and mean frequency of sEMG of testees in groups V and I, and such changes of testees in group I were more obvious; 2) with respect to testees in group I, the M_{\max} and ratio H/M_{\max} of tibial anterior muscle (agonist) were significantly lowered, and there was no significant change to the M_{\max} and ratio H/M_{\max} of soleus muscle (antagonist) after tibial anterior muscle fatigued; 3) with respect to testees in group V, ratio H/M_{\max} of tibial anterior muscle and soleus muscle was significantly lowered after the occurrence of muscle fatigue, but there was no significant change to the M_{\max} of both muscles. Conclusions: When the muscle fatigued, not only the spinal motor neurons of the agonist were restrained, but also the spinal motor neurons of the antagonist were affected similarly, but the said changes were not completely the same due to the difference between muscular contraction modes.

Key words: voluntary motion; electric stimulation; fatigue; superficial electromyogram; induced electromyogram

在运动性肌疲劳的神经生理学研究领域中, 对脊髓中枢调控机制的研究越发引人关注^[1-2]。为进一步探讨不同运

收稿日期: 2006-05-23

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金 (课题编号: 教外司留 2005-383)

作者简介: 王国祥 (1963-), 男, 教授, 博士, 研究方向: 体育保健学。

动形式对脊髓调控中枢的影响及肌肉疲劳时脊髓运动神经元兴奋性的变化, 本文在前期实验的基础上, 采用电刺激诱发肌肉收缩与随意运动相结合的方法, 对肌疲劳发生过程中主动肌与拮抗肌的脊髓运动神经元兴奋性变化进行了比较分析。

1 材料与方法

1.1 实验对象

实验对象为未经过专项体育训练的某大学医学院 10 名健康男子大学生, 平均年龄 (21.2±1.8) 岁, 受试者对本研究的目的是基本要求均能充分理解。全体受试者均分别进行随意性足关节背屈运动 (随意运动组, 简称 V 组) 和电刺激诱发胫骨前肌收缩 (电刺激组, 简称 E 组) 的两次实验, 两次实验间隔时间为 1 周。

1.2 运动方式

肌肉力量测定装置采用 Biodex system-3。受试者座位, 被检测的肢体膝关节呈 150°、踝关节 120°位固定, 然后确定其运动前足关节背屈时最大力量 (MVC, Maximal Voluntary Contraction)。V 组采用间断性足关节背屈运动的方法, 即每间隔 1 min 进行一次 20 s 的最大性持续性足关节背屈运动, 整个实验过程共连续进行 10 次。E 组采用对腓骨小头下方的腓总神经进行低频电刺激方法^[3], 来诱发胫骨前肌 (TA) 收缩。为了使两组实验过程保持一致, E 组也采用每间隔 1 min 进行一次 20 s 的电刺激, 刺激电流波宽 1 ms、频率 20 Hz, 刺激强度为最大 M 波 (compound muscle action potential) 强度的 1.5 倍。E 组各阶段的 MVC 的测定值, 均在每次 20 s 的电刺激停止后, 再进行 3 s 的最大性足关节背屈运动来确定。为了保证两组对象的可比性, V 组的 MVC 也同样在 20 s 随意运动后, 再进行 3 s 的运动来确定。

1.3 肌电图测定

采用表面电极双极导联法, 记录电极置于 TA 和比目鱼肌 (SOL) 的肌腹部。电刺激装置采用日本光电公司产 3F-46

刺激器, 两个刺激电极分别置于腓骨小头下方和腓窝正中部, 交替刺激分别诱发 TA 和 SOL 的诱发肌电图 (evoked EMG)。导出的肌电信号经生物电放大器 (Bio Amp ML132) 增幅后, 输入 A/D 转换器 (MacLab/8s A/D Instruments) 进行信号转换, 再使用 Chart-V4.2 波形数据处理系统对信号进行处理分析, 计算分析出 evoked EMG 的最大 H 波 (H_{max})、M 波 (M_{max}) 以及 H_{max} 与 M_{max} 的比值 (H/M_{max})。为对两种方法导致的肌疲劳进行客观判定, 本研究同时记录了两组对象运动过程 TA 表面肌电图 (sEMG) 的积分值 (iEMG) 和中位频率 (MF) 变化。

1.4 数据处理

由于受试对象之间的 MVC 绝对值和 EMG 存在着个体差异, 本研究分别将运动前的 MVC 和 M_{max} 、 H_{max} 以及 H/M_{max} 等成分的平均值先换算成 100%, 再将运动后各时点的数值换算成其百分比的相对值。数据处理采用统计软件 Stat View-J5.0, 所有数据用均数±标准差表示, 统计分析采用 T 检验, $P<0.05$ 为显著性差异水平。

2 结果与分析

2.1 运动过程中 MVC 和 sEMG 的 iEMG 和 MF 的变化

表 1 表明, V 组 MVC 从第 3 次运动开始呈现逐渐下降趋势, 在第 10 次运动后下降至运动前的 30.2%; E 组在第 5 次电刺激时点前的曲线快速下降, 而后趋于平稳, 第 10 次电刺激后下降至运动前的 24.8%。E 组的 iEMG 从第 4 次电刺激诱发肌肉收缩后, 与运动前比较明显下降 ($P<0.05$); V 组从第 8 次运动后明显下降, 与运动前比较呈非常显著性差异 ($P<0.01$); 两组间比较, E 组下降时点快于 V 组, 而且从第 4 次开始两组间呈现显著性差异 ($P<0.05$)。E 组和 V 组的 MF 分别从第 2 次和第 3 次运动明显下降, 与运动前比较均呈显著性差异 ($P<0.05$); E 组 MF 下降时点明显快于 V 组, 并从第 5 次运动结束后开始, 两组间比较呈现显著性差异。

表 1 两种不同运动形式 MVC 和胫骨前肌 iEMG、MF ($\bar{x} \pm s$) 的变化 ($n=10$)

| 运动次数 | MVC/% | | iEMG/% | | MF/Hz | |
|------|-----------|------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | V 组 | E 组 | V 组 | E 组 | V 组 | E 组 |
| 运动前 | 100 | 100 | 100 | 100 | 72.3±10.7 | 71.4±9.2 |
| 1 | 99.2±8.4 | 102.6±9.4 | 103.1±13.4 | 101.9±12.1 | 71.2±10.5 | 68.8±11.9 |
| 2 | 87.7±9.1 | 106.7±10.3 | 101.5±13.8 | 92.1±13.5 | 69.7±13.6 | 57.8±12.8 ¹⁾ |
| 3 | 64.7±7.2 | 91.1±9.7 | 104.8±12.8 | 93.7±14.2 | 60.7±14.5 ¹⁾ | 46.0±14.3 ²⁾³⁾ |
| 4 | 54.0±9.0 | 76.7±10.3 | 106.3±14.2 | 87.3±12.3 ¹⁾ | 56.7±15.1 ¹⁾ | 44.6±13.9 ²⁾³⁾ |
| 5 | 41.4±8.1 | 51.1±11.0 | 105.1±14.5 | 80.9±11.7 ²⁾³⁾ | 57.4±14.2 ¹⁾ | 42.3±14.1 ²⁾³⁾ |
| 6 | 42.7±9.4 | 37.0±12.4 | 104.4±13.4 | 78.5±12.3 ²⁾⁴⁾ | 53.2±13.4 ²⁾ | 40.4±11.2 ²⁾³⁾ |
| 7 | 43.5±7.9 | 32.1±11.9 | 93.1±14.5 | 77.2±12.3 ²⁾⁴⁾ | 53.7±14.9 ²⁾ | 39.3±13.2 ²⁾³⁾ |
| 8 | 37.3±9.4 | 27.3±12.4 | 83.4±14.3 ²⁾ | 65.5±14.1 ²⁾³⁾ | 53.3±15.4 ²⁾ | 37.1±12.1 ²⁾³⁾ |
| 9 | 34.3±10.1 | 37.6±13.1 | 84.1±14.1 ²⁾ | 62.1±14.2 ²⁾⁴⁾ | 48.3±14.1 ²⁾ | 35.9±11.8 ²⁾³⁾ |
| 10 | 30.2±10.8 | 24.8±10.4 | 82.7±14.4 ²⁾ | 58.7±14.0 ²⁾⁴⁾ | 49.4±13.8 ²⁾ | 35.7±11.5 ²⁾³⁾ |

与运动前比较 1) $P<0.05$, 2) $P<0.01$; V 组与 E 组之间的比较 3) $P<0.05$, 4) $P<0.01$ 。

2.2 运动前后 TA 与 SOL 的 evoked EMG 的 M_{\max} 和 H/M_{\max} 的变化

(1) TA 的组 V 与 E 组比较: V 组 M_{\max} 运动前后无明显改变, 而 E 组 M_{\max} 与电刺激前比较明显降低 ($P<0.01$), 两组间比较差异呈非常显著性 ($P<0.01$); E 组和 V 组的 H/M_{\max} 与运动前比较, 均明显降低 ($P<0.01$), 但两组间差异未见显著性。

(2) SOL 的 V 组与 E 组比较: V 组和 E 组的 M_{\max} 运动前后均无明显差异, V 组 H/M_{\max} 与运动前比较明显降低 ($P<0.05$); E 组 H/M_{\max} 与运动前比较虽有所降低, 但差异未呈现显著性 ($P=0.172$)。

表 2 不同运动形式运动前后 AT 与 SOL 的 M_{\max} 和 H/M_{\max} ($\bar{x} \pm s$) %

| 组别 | n/ 人 | M_{\max} | | H/M_{\max} | |
|-----|---------|--------------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|
| | | 胫骨前肌 | 比目鱼肌 | 胫骨前肌 | 比目鱼肌 |
| V 组 | 10 | 99.4±11.7 | 102.1±9.4 | 82.3±9.4 ³⁾ | 91.2±10.2 ²⁾ |
| E 组 | 10 | 83.7±8.4 ²⁾⁴⁾ | 99.8±9.6 | 88.8±10.6 ³⁾ | 94.8±11.3 |

1)运动前的值为 100.0±0.0; 与运动前比较 2) $P<0.05$; 3) $P<0.05$; 4) 两组比较 $P<0.01$

3 讨论

本研究 V 组和 E 组对象的 MVC 在实验实施过程中逐次降低, iEMG 和 MF 也均出现了明显下降现象, 说明本研究采用的间断性最大足关节背屈运动和电刺激诱发 TA 收缩方法, 制作出肌肉疲劳的模型是成立的。

诱发肌电图的 M 波振幅一般可以看做神经肌肉接头部动作电位或者终板电位复合电位的幅度, 而最大 M 波振幅值则可以用来评价神经肌肉接头部神经递质储存和释放能力。目前对随意运动引起肌肉疲劳时 M_{\max} 变化的研究虽然很多, 但结果并未形成一致。如 Bellemar^[4]报道持续性最大力量肌肉收缩而至肌疲劳后, M_{\max} 振幅呈明显低下; 但也有实验研究发现, 采用持续性 50%MVC 运动引起肌疲劳后, M_{\max} 振幅未发生明显变化^[2]。本研究采用间断性 TA 收缩方式的研究结果表明, V 组运动前后 M_{\max} 无明显变化, 但 E 组的 M_{\max} 在电刺激开始阶段, 即在肌肉力量未发生明显下降前就出现了降低现象。E 组 M_{\max} 的变化结果, 可能由于反复性的电刺激能够对神经肌肉接头神经递质释放活动产生影响, 从而引起了肌肉兴奋-收缩耦联机能不全而导致 TA 收缩力下降。SOL 作为拮抗肌并未参与收缩活动, M_{\max} 则未发生变化。

H 波 (Hoffmann reflex) 是外周神经纤维受到刺激时, 刺激冲动经由 Ia 感觉神经传入纤维传至脊髓内并使脊髓 α 运动神经元发生兴奋而诱发产生的单突触性反射电位。由于 M 波变化容易对 H 波振幅大小产生影响, 近年来更多的学

者认为, H_{\max} 与 M_{\max} 比值 (H/M_{\max}) 的变化, 更能直接反映脊髓 α 运动神经元兴奋性的变化^[5-6]。本研究发现, TA 疲劳后 V 组和 E 组的 H/M_{\max} 明显低下, 这说明随意性肌肉收缩和电刺激诱发肌肉收缩的两种不同的运动形式导致肌疲劳后, 脊髓运动神经元的兴奋性均受到了抑制, 而且在肌疲劳发生过程中二者的抑制程度未发现明显差异。虽然引起这种脊髓运动神经元兴奋性变化的机制十分复杂, 并非单一因素所致, 但外周传入信息的影响可能是导致脊髓运动神经元兴奋性受到抑制的重要因素之一^[7]。

TA 与 SOL 是一对踝关节屈伸活动中相互拮抗的肌肉, 即 TA 收缩 (TA 脊髓神经元兴奋) 时 SOL 舒张 (SOL 神经元被抑制), 反之亦然。这种伴随着主动肌收缩而拮抗肌运动神经元发生抑制的反射活动称为交互抑制, 该反射活动对运动中肢体姿势和关节角度的调整及微细动作的选择, 有着极其重要的意义^[8]。交互抑制发生的机制是主动肌收缩时肌梭发放的神经冲动, 经 Ia 类感觉传入纤维兴奋脊髓内的 Ia 抑制性中间神经元, 后者再直接对其拮抗肌脊髓 α 运动神经元产生抑制作用。研究早已证实, 交互抑制活动只有在主动肌收缩状态下才能发生, 当肌肉收缩运动终止后主动肌的肌梭放电活动亦会停止, Ia 感觉神经纤维传入冲动也会随之而消失^[9]。但本研究发现, 当 V 组因 TA (主动肌) 疲劳而足背屈运动终止后, 其拮抗肌比目鱼肌 H/M_{\max} 并没有立即恢复, 仍然低于运动前水平。由此可以说明, 主动肌疲劳状态下, 不但主动肌脊髓运动神经元受到了抑制, 而且拮抗肌脊髓运动神经元也同样受到了影响。因此可以推测, 本研究 V 组运动结束后 SOL (拮抗肌) 神经元兴奋性仍然呈现低下现象的原因, 应该属于交互抑制反射弧活动以外的因素。关于主动肌疲劳后而拮抗肌脊髓运动神经元兴奋性下降的机制, 相关研究曾提出了与主动肌 Ia 感觉神经纤维传入途径无关, 而可能受 III·IV 类神经纤维的感觉传入冲动改变的影响而引起的^[1], 但目前仍未见进一步的研究报道。本实验还发现, E 组运动结束时, TA 的力量下降的幅度与 V 组结束时基本相同, 但 E 组 SOL 的 H/M_{\max} 并未出现明显的改变。导致 E 组与 V 组之间 SOL 的 H/M_{\max} 变化不同的生理学机制, 本研究虽然还不能直接揭示, 但有一点应该明确, 随意运动与电刺激诱发肌肉收缩, 对脊髓调控中枢活动的影响存在着很大的差异。因此本文建议: 虽然采用电刺激方法诱发肌疲劳是目前研究和制作末梢性疲劳 (或外周性疲劳) 模型的主要方法, 但对外周神经或骨骼肌进行电刺激时, 也会直接或间接影响到脊髓中枢神经元的活动, 所以在末梢性疲劳的研究过程中, 也应该考虑外周因素对中枢系统的影响。

本研究采用电刺激诱发肌肉收缩和随意性运动两种运动形式, 对 TA 疲劳后 TA 和 SOL 的 M_{\max} 、 H/M_{\max} 等变化进行了比较分析。结果发现肌疲劳发生后, (1) E 组 TA 的

M_{\max} 与疲劳前比较振幅明显低下；(2) V 组和 E 组 TA 的 H/M_{\max} 均出现了低下现象，但二者无明显差异。(3) V 组 SOL 的 H/M_{\max} 与疲劳前比较明显低下，E 则无明显差异。由此可以说明，肌肉放电活动异常、神经肌肉接头部传导不全及脊髓运动神经元兴奋性低下，都可以成为肌肉疲劳发生的重要因素，特别是采用外周刺激方法诱发性肌肉疲劳的运动形式，也可能会导致脊髓运动神经元的兴奋性发生变化，而随意运动与电刺激诱发肌肉收缩，对脊髓调控中枢活动的影响存在着很大的差异。

参考文献：

- [1] 王国祥, Kiyaooshi Onari. 胫骨前肌疲劳时比目鱼肌诱发肌电图 H 波的变化及其机制探讨[J]. 中国运动医学杂志, 2004, 23 (1): 16-20.
- [2] 王国祥. 肌疲劳时诱发肌电图 M 波和 H 波的变化特点[J]. 体育科学, 2004, 24(7): 34-36.
- [3] Garland B S. Role of small diameter afferents in reflex inhibition during human muscle fatigue [J]. J Physiol, 1991, 435: 547-558.
- [4] Bellemare F, Garzaniti N. Failure of neuromuscular propagation during human maximal voluntary contraction[J]. J Appl Physiol, 1988, 64: 1084-1093.
- [5] Pensini M, Martin A. Effect of voluntary contraction intensity on the H-reflex and V-wave responses[J]. Neurosci Letters, 2004, 367(3): 369-74.
- [6] Guette M, Gondin J, Martin A. Morning to evening changes in the electrical and mechanical properties of human soleus motor units activated by H reflex and M wave[J]. Eur J Appl Physiol, 2005, 95(4): 377-81.
- [7] Kernell D, Monster A. Motoneurone properties and motor fatigue [J]. Exp Brain Res, 1982, 46(2): 197-204.
- [8] 姚 泰. 生理学(第 6 版) [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004: 293.
- [9] Shindo M, Halayama T, Sagaguti K, et al. Changes in reciprocal I a inhibition during voluntary contraction in man[J]. Exp Brain Res, 1984, 53: 400-408.

[编辑: 郑植友]