

· 综述 ·

功能性电刺激结合圆周运动对脊髓损伤患者
下肢功能重建的作用

王欣 王宁华 谢斌 王荣丽

脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)患者因肌肉的失神经支配可致肢体活动能力受到影响并导致一些合并症的产生,常见的有心血管功能降低、肥胖、压疮、肌肉废用性萎缩和骨质疏松等,这些合并症将进一步加重患者的功能障碍,加重其残损程度,严重时常会危及生命。

自上个世纪 60 年代起,功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)作为治疗 SCI 肌肉瘫痪的手段之一被广泛应用于临床。在 FES 的刺激下,可以诱发肢体出现一些简单的功能性活动。近年来随着科技水平的提高,复杂真实的日常生活功能性活动结合 FES 被逐渐开发和应用,FES 结合踏板运动就是其中之一。FES 结合下肢圆周运动是针对股四头肌、腓绳肌和臀大肌的电刺激,通过被动或主动-辅助方式来产生有节律的周期性踏板运动。目前,有越来越多的证据证明,FES 结合下肢圆周运动的训练对减少 SCI 后的合并症有显著效果,并已在临床中应用。本文针对 FES 结合下肢圆周运动对 SCI 患者产生各种效应进行综述。

对肌张力的影响

FES 结合下肢圆周运动训练可以降低 SCI 患者的下肢张力,从而改善下肢痉挛状态^[1-2]。FES 可以使受刺激的肌肉收缩,增加局部的血流,加强局部循环,并且可以诱发产生一些全身的效应,这些是单纯的被动活动所不能达到的作用。Krause 等^[3]对 5 例 ASIA 分级 A 级的 SCI 患者进行 FES 结合下肢被动圆周运动练习,训练中采用波宽 500 ms、频率 20 Hz 的双向脉冲方波,强度为 0~99 mA,以患者耐受为度,对患者臀肌肌群、腓绳肌和股四头肌进行刺激,以固定转速对患者进行训练,训练前后分别用 Ashworth 量表对其肌张力进行评定,用钟摆试验(pendulum test,主要针对其放松指数和峰速度)对其痉挛状态进行评估,结果表明,训练后放松指数和峰速度均有所提高,Ashworth 量表评分降低。FES 结合下肢圆周运动与单纯的下肢圆周运动相比,有证据显示单纯的下肢圆周运动在降低 SCI 患者痉挛方面无效果^[4]。

有学者建议在进行电刺激诱发的下肢圆周运动训练时,采用调制中频取代传统的低频^[5],因为在缓解下肢痉挛时,调制中频与标准的方波相比,能产生更大的等速力矩和更大的力量,并且在心血管、肌力训练和缓解痉挛等方面效果均更为显著。

对肌肉能量输出的影响

在下肢圆周运动中,踏板的转动频率决定了肌肉的收缩速

度。对于向心性收缩而言,肢体运动速度增加时肌肉力量降低。对于 SCI 患者来说,在低转动频率(如 <20 转/min)的踏板活动中对转轴能够产生更大的力矩,这说明在低转速的踏板运动中可以有更多的能量输出。在 FES 结合下肢圆周运动中,观察到的力量-速度之间的关系与刺激健康肌肉时所得到的结果是一致的。

在 FES 结合下肢圆周运动的训练活动中,踏板的节律对力矩产生和力量输出都有很显著影响。使用 FES 踏板运动来对 SCI 患者进行的一项研究发现,结合低频 FES 的下肢圆周运动训练中,踏板转速高的训练比转速低的训练更能诱发较强的肌肉能量输出。Fornusek 等^[4]将 39 例 SCI 患者分为 3 组,分别使用低频 FES 结合不同转速的下肢圆周运动对其进行训练,踏板转速分别为 15 转/min、30 转/min 和 50 转/min。他们发现,在持续 35 min 的训练中,特别是从开始训练 15 min 后,在对股四头肌进行肌肉力量输出测试中,使用 30 转/min 和 50 转/min 的 FES 结合下肢圆周运动训练与 15 转/min 的相比,肌肉力量输出更加明显,并且在此二种节律下的总机械效能明显较高,但 3 组之间的肌肉氧和程度(muscle oxygenation)却无差异。

在 SCI 损伤节段以下的肌肉会发生变化,如体积减小、力量变弱和肌纤维转化为快速酵解性纤维等,并且很容易产生疲劳,这些改变都会使 SCI 患者更容易合并如肥胖、II 型糖尿病和压疮等。FES 结合下肢圆周运动可以降低或逆转这些 SCI 后并发症的发生率,并且这种下肢圆周运动同时也可以作为患者的一项休闲活动来进行^[6]。Duffell 等^[6]对 11 例 SCI 患者进行每天 1 次、每周 5 d、为期 1 年的 FES 结合下肢圆周运动训练后与正常个人进行比较,试验中用 FES 对其股四头肌、腓绳肌、臀大肌和腓肠肌进行刺激,结果显示股四头肌在 FES 刺激下的力矩增加了 5 倍,但仍低于正常个体组,且能量输出峰值有所提高,并且这种提高可以维持 9~36 周的时间,这与 Mohr 等^[7]的研究结果(6~42 周)是一致的。产生力量的不同肌肉组间的协调可能是优化 FES 结合下肢圆周运动训练中能量输出的关键因素。有相关研究指出,FES 结合下肢圆周运动训练对正常人群^[8]和 SCI 患者^[9]的能量输出的提高无明显作用,认为这可能与生理学的(肌力低、血流差和携氧量低)和力学性的因素相关(刺激模式和不自然的肌纤维募集模式)。

FES 结合下肢圆周运动训练可以提高 SCI 患者的下肢肌力,并且低频踏板转动节律下肌肉力量提高更明显。Fornusek 和 Davis^[10]将 9 例 SCI 患者随机分为 2 组,分别对其使用转动频率不同的 FES 结合下肢圆周运动进行为期 6 个月的训练,2 组频率分别为 15 转/min 和 50 转/min,每次训练 35 min,训练中采用频率为 35 Hz、波宽为 250 ms 和强度为 70~140 mA 的 FES 对患者的股四头肌、腓绳肌和臀大肌进行刺激。在训练的前 15 min,高频组患者的能量输出较高;35 min 训练结束后,低频组的平均能量输出显著高于高频组。这是因为高频踏板转动与

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2011.01.024

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA02Z482);北京市科委重大项目(D08050700330000);北京市首都发展基金(2007-2004)
作者单位:100034 北京,北京大学第一医院物理医学与康复科

低频踏板转动相比,在较短的时间内便会产生肌肉疲劳,从而影响了疲劳产生后肌肉的能量输出,导致平均能量输出降低。与正常人相比,在 FES 结合下肢圆周运动中,SCI 患者快肌纤维优先募集与否将影响氧耗(VO_2)、能量输出和踏板节律。在低频节律时慢肌纤维起主要作用,反之,在高频节律时快肌纤维起主要作用。这两种情况下 VO_2 不会有明显差异,尽管在高频节律时能量输出更高,但快肌纤维在较快速的收缩时能耗降低而效率增加。

对瘫痪肌肉抗疲劳性的影响

对于慢性 SCI 患者来说,患肢的循环功能不良可能是导致患者在接受 FES 治疗过程中疲劳加速产生的原因。最近的研究显示,SCI 患者与正常人在进行 FES 运动时相比,产生的血流峰值大致相同,但是 SCI 患者达到血流峰值所需要的时间延长,这样将会加速疲劳的产生^[11]。在进行 FES 结合下肢圆周运动中,较高的踏板节律更易产生疲劳^[12],但是肌肉的氧合程度与踏板节律无关^[5]。Bhambhani 等^[13]研究发现,在自主运动时,肌肉的氧饱和程度与在进行 FES 结合下肢圆周运动时的氧饱和程度相比,下降得更多,这表明氧供并不是限制 FES 结合圆周运动的限制因素。SCI 患者的股四头肌抗疲劳性明显低于正常人;而在经过 3 个月的 FES 结合下肢圆周运动训练后,SCI 患者的股四头肌抗疲劳性显著提高^[14],这可能与血流、毛细血管与肌纤维比率和柠檬酸合成酶活性增加有关。在 9 个月训练后,抗疲劳性的提高是由于氧化酶和葡萄糖酵解酶活性的提高,也可能与肌纤维由 IIX 型转变为 IIA 型有关。IIX 型肌纤维的特性介于快慢纤维之间,IIX 型肌纤维兼有快肌纤维和慢肌纤维的某种特性,其在氧化代谢方面与慢肌纤维相似,在生物物理特性方面则与快肌纤维相似。现在有一种推断认为,IIX 型肌纤维是快肌纤维向慢肌纤维转化过程中的一个环节,这种转化可以通过适当的训练来发生,但其功能目前仍不明确。在经过 9 个月训练后,SCI 患者的股四头肌成分已接近正常^[6]。Andersen 等^[15]对 SCI 患者进行一年 FES 结合下肢圆周运动的训练中发现,SCI 患者肌纤维由 IIX 型转变为 IIA 型。目前的研究表明,更长的训练持续时间对抗疲劳性的提高效果更好,这可能是与肌纤维类型由 I 型转化为 II 型有关。Harridge 等^[14]报道了在每天 2 h、每周 5 d 的电刺激运动中,I 型肌纤维中 mRNA 的数量有提高。组织活检可以证明肌纤维类型确实存在转变。

踏板节律对膝关节角速度的影响

不同的踏板转速对膝关节产生的角速度峰值也会有影响。有研究表明,在下肢圆周运动中,使用 FES 对股四头肌进行刺激时,在踏板转速为 10 转/min、20 转/min 和 50 转/min 的运动中,膝关节处产生的角速度峰值分别为 $20^\circ/\text{s}$ 、 $60^\circ/\text{s}$ 和 $100^\circ/\text{s}$ ^[16]。由此可见,膝关节的角速度峰值随踏板转动速度的提高而增加,但二者增加的程度并不成正比关系。关于膝关节处产生的角速度峰值对下肢的功能性活动是否产生影响,尚未得知。

机体的生理学效应

在 SCI 患者中,特别是 SCI 的儿童,有部分会发生肌肉骨骼

系统和心血管系统的合并症,从而使其功能恢复受到影响,甚至可能威胁生命。SCI 患者在经过 FES 结合下肢圆周运动训练后,其心血管机能、骨密度、肌围度和被 FES 刺激肌肉的力量与体积都会有所提高^[17-19],而且对静息心率的监测可以发现经过训练后静息心率有所下降^[20]。在此需要指出的是,不同的踏板转动节律对提高心血管功能方面的作用上无显著差异^[5]。而通过 FES 诱发的肢体活动可以产生的一些生理学效应,如提高机体的新陈代谢水平、加强局部血液循环、增加特殊新陈代谢酶的数量和提高某些激素水平等,对 SCI 患者的恢复都起到有利的作用^[21]。

Angela 等^[22]对 11 例慢性完全性 SCI 的患者进行了 FES 结合下肢圆周运动训练对其骨密度影响的研究,在经过 12 个月的高强度 FES 结合下肢圆周运动的训练,每周 3~4 次,每次 1 h。结果显示,远端股骨骨骺纵截面积显著增加,大腿部肌肉横截面积显著增加,脂肪横截面积减小。这个实验表明,经过高强度的 FES 结合下肢圆周运动训练可以使患肢特定区域的骨骼发生改变,改变发生于主动负荷的股骨远端,而被动负荷的胫骨则无此变化,这可能是由于在小腿未使用 FES 的结果。因此,FES 结合下肢圆周运动可以逆转骨质的流失,并且能够降低骨折发生的危险性,但是远端股骨的骨密度增加对减低骨折发生率的作用尚需进一步研究。虽然有很多学者都对 FES 结合下肢圆周运动对骨骼的作用有所研究,但目前对 FES 作用于瘫痪肢体的最佳刺激参数仍未有定论。

Frotzler 等^[23]对 5 例 SCI 患者进行为期 1 年的高强度 FES 结合下肢圆周运动训练(30 min/次,2~3 次/周),1 年后在这 5 例患者中选取 4 例患者停止训练 1 年,另 1 例患者进行低强度训练 1 年。研究结果发现,4 例不进行训练的患者停训 1 年后骨小梁骨密度、总骨密度和大腿肌肉横截面积分别为训练结束时的 73.0%、63.8% 和 22.1%,而维持低强度训练 1 年的 1 例患者为 96.2%、95.0% 和 98.5%。通过分析数据,研究者认为,通过 12 个月高强度训练后的效果至少可以维持 1 年,并且低强度的维持性训练可以维持原高强度训练所获得的效果。

Johnston 等^[24]对 30 例年龄介于 5~13 岁、损伤平面为 $\text{C}_4 \sim \text{T}_{11}$ 的 SCI 患儿进行下肢圆周运动训练,将患儿随机分为单纯被动下肢圆周运动组、FES 结合下肢圆周运动组以及单纯电刺激组,对其进行每周 3 次、每次 1 h、为期 6 个月的家庭训练,观察训练后心肺功能变化情况。结果表明,FES 结合下肢圆周运动组与单纯被动下肢圆周运动组相比, VO_2 有所提高,而单纯电刺激组患儿的胆固醇水平有所上升,作者认为,FES 结合下肢圆周运动训练可以使患者获得更大的氧耗而单纯的电刺激可以导致胆固醇水平的升高。

在 SCI 患者中,由于肌肉瘫痪不能满足活动的 VO_2 需求,因此,SCI 患者若欲达到一个较高的 VO_2 的水平,通常是通过过度的上半身训练而达到,但是这样却增加了肌肉骨骼系统发生过度的使用损伤的危险。在对 SCI 患者的训练中,通过使用 FES 结合上肢的踏车运动或 FES 结合上肢的混合运动,都可以提高患者的 VO_2 水平^[25]。与 FES 结合上肢的踏车运动相比,FES 结合上肢的混合运动对 VO_2 水平的提高效果更显著,且混合运动这种类型更加适合于高强度的训练中。这些训练可以提高正常人群的体适能,但是否对 SCI 患者的体适能也有提高作用则须进一步研究。

使用 FES 结合下肢圆周运动训练时应注意的问题

髋关节半脱位是 SCI 患者常见的问题,特别是对于年龄在 10 岁以下的 SCI 患儿,因此在进行下肢圆周运动训练中应注意。为了避免在下肢圆周运动活动诱发髋关节半脱位的出现,应在训练中防止髋关节的内收和内旋,以避免增加半脱位出现的应力^[26]。

总 结

随着对 FES 结合下肢圆周运动训练研究的不断增加与深入,表明此项训练对瘫痪肢体的功能恢复有积极的正向作用。FES 结合下肢圆周运动训练已从最初单纯用于 SCI 患者,渐渐过渡到用于同属中枢神经系统损伤的脑卒中后患者和脑瘫患者中,但由于瘫痪的性质有所不同,在应用时尚存在不同。能量输出可能为限制 FES 结合下肢圆周运动训练效果的关键因素,但影响能量输出的决定性因素尚不明确。对于主动和被动训练在 FES 结合下肢圆周运动之间的差异,目前尚无研究涉及。关于 FES 在训练中的最佳参数,以及各个不同参数对功能恢复不同方面的作用的研究应进一步深入明确。

参 考 文 献

- [1] Barbeau H, Ladouceur M, Mirbagheri MM, et al. The effect of locomotor training combined with functional electrical stimulation in chronic spinal cord injured subjects; walking and reflex studies. *Brain Res Brain Res Rev*, 2002, 40: 274-291.
- [2] Szecsi J, Fornusek C, Krause P, et al. Low-frequency rectangular pulse is superior to middle frequency alternating current stimulation in cycling of people with spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil*, 2007, 88: 338-345.
- [3] Krause P, Szecsi J, Straube A. Changes in spastic muscle tone increase in patients with spinal cord injury using functional electrical stimulation and passive leg movements. *Clin Rehabil*, 2008, 22: 627-634.
- [4] Fornusek C, Davis GM. Cardiovascular and metabolic responses during functional electric stimulation cycling at different cadences. *Arch Phys Med Rehabil*, 2008, 89: 719-725.
- [5] Szecsi J, Schiller M. FES-propelled cycling of SCI subjects with highly spastic leg musculature. *Neuro Rehabil*, 2009, 24: 243-253.
- [6] Duffell LD, Donaldson Nde N, Perkins TA, et al. Long-term intensive electrically stimulated cycling by spinal cord-injured people: effect on muscle properties and their relation to power output. *Muscle Nerve*, 2008, 38: 1304-1311.
- [7] Mohr T, Andersen JL, Biering-Sørensen F, et al. Long term adaptation to electrically induced cycle training in severe spinal cord injured individuals. *Spinal Cord*, 1997, 35: 1-16.
- [8] Kjar M, Perko G, Secher NH, et al. Cardiovascular and ventilatory responses to electrically induced cycling with complete epidural anaesthesia in humans. *Acta Physiol Scand*, 1994, 151: 199-207.
- [9] Glaser RM, Ficoni SF, Hooker SP, et al. Efficiency of FNS leg cycle ergometry. *Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 1989, 3: 961-963.
- [10] Fornusek C, Davis GM. Maximizing muscle force via lowcadence FES cycling. *Rehabil Med*, 2004, 36: 232-237.
- [11] Olive JL, Slade JM, Dudley GA, et al. Blood flow and muscle fatigue in SCI individuals during electrical stimulation. *J Appl Physiol*, 2003, 94: 701-708.
- [12] Fornusek C, Davis GM. Maximizing muscle force via low cadence FES cycling. *Rehabil Med*, 2004, 36: 232-237.
- [13] Bhambhani Y, Tuchak C, Burnham R, et al. Quadriceps muscle de-oxygenation during functional electrical stimulation in adults with spinal cord injury. *Spinal Cord*, 2000, 38: 630-638.
- [14] Harridge SDR, Anderson JL, Hartkopp A, et al. Training by low frequency stimulation of tibialis anterior in spinal cord injured men. *Muscle Nerve*, 2002, 25: 685-694.
- [15] Andersen JL, Mohr T, Biering-Sørensen F, et al. Myosin heavy chain isoform transformation in single fibres from m. vastus lateralis in spinal cord injured individuals; effects of long-term functional electrical stimulation (FES). *Pflugers Arch*, 1996, 431: 513-518.
- [16] Ché Fornusek, Peter J. Sinclair. The force-velocity relationship of paralyzed quadriceps muscles during functional electrical stimulation cycling. *Neuromodulation: technology at the neural interface*. 2007, Volume 10, 68-75.
- [17] Janssen TWJ, Glaser RM. Clinical efficacy of electrical stimulation exercise training; effects on health, fitness and function. *Top Spinal Cord Injury*, 1998, 3: 33-49.
- [18] Kakebeeke TH, Hofer PJ, Frotzler A, et al. Training and detraining of a tetraplegic subject: high-volume FES cycle training. *Am J Phys Med Rehabil*, 2008, 87: 56-64.
- [19] Frotzler A, Coupaud S, Perret C, et al. High-volume FES-cycling partially reverses bone loss in people with chronic spinal cord injury. *Bone*, 2008, 43: 169-176.
- [20] Johnston TE, Smith BT, Oladeji O, et al. Outcomes of a home cycling program using functional electrical stimulation or passive motion for children with spinal cord injury: a case series. *J Spinal Cord Med*, 2008, 31: 215-221.
- [21] Davis GM, Hamzaid NA, Fornusek C. Cardiorespiratory, metabolic, and biomechanical responses during functional electrical stimulation leg exercise; health and fitness benefits. *Artif Organs*, 2008, 32: 625-629.
- [22] Angela F, Sylvie C, Perret C, et al. High-volume FES-cycling partially reverses bone loss in people with chronic spinal cord injury. *Bone*, 2008, 43: 169-176.
- [23] Frotzler A, Coupaud S, Perret C, et al. Effect of detraining on bone and muscle tissue in subjects with chronic spinal cord injury after a period of electrically-stimulated cycling: a small cohort study. *Rehabil Med*, 2009, 41: 282-285.
- [24] Johnston TE, Smith BT, Mulcahey MJ, et al. A randomized controlled trial on the effects of cycling with and without electrical stimulation on cardiorespiratory and vascular health in children with spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil*, 2009, 90: 1379-1388.
- [25] Hettinga DM, Andrews BJ. Oxygen consumption during functional electrical stimulation-assisted exercise in persons with spinal cord injury: implications for fitness and health. *Sports Med*, 2008, 38: 825-838.
- [26] Johnston TE, Betz RR, Lauer RT. Impact of cycling on hip subluxation in children with spinal cord injury. *J Pediatr Orthop*, 2009, 29: 402-405.

(修回日期: 2010-11-20)

(本文编辑: 阮仕衡)