

临床论著

脊柱手术中多模式神经电生理监测
异常的原因分析及处理对策

黄霖, 赵敏, 王鹏, 陈铿, 蔡兆鹏, 唐勇, 叶记超, 胡旭民, 沈慧勇

(中山大学孙逸仙纪念医院脊柱外科 510120 广州市)

【摘要】目的:分析脊柱手术中影响术中神经电生理监测的因素,总结提高术中神经监测成功率的技术要点。方法:回顾分析 476 例脊柱手术中使用体感诱发电位(somatosensory evoked potential, SEP)、经颅电刺激运动诱发电位(motor evoked potentials, MEP)、自由肌电图(free-run electromyography, Free-run EMG)多模式联合监测患者的资料,对术中神经监测出现异常改变的患者进行原因分析。结果:76 例术中电生理监测发生异常,其中 21 例患者因术前存在神经功能障碍,8 例因手术操作引起神经损伤,7 例因肌松药使用不合理,8 例因不合理使用吸入麻醉药,3 例因患者发生肌颤导致下肢 SEP 监测异常,4 例因电磁场干扰,7 例因患者体位摆放不当,7 例因电极线连接故障,11 例原因不明。其中 28 例经采取合理干预措施使得神经监测异常得以纠正。结论:对诱发异常的病例应从操作技术、麻醉、电磁场环境、患者因素等多方面逐一分析原因,采取积极有效的措施,以提高监测的成功率。

【关键词】脊柱手术;神经电生理监测;体感诱发电位;经颅电刺激运动诱发电位;自由肌电图

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2015.07.05

中图分类号:R741.04, R687.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2015)-07-0594-08

Cause analyses and strategies on abnormalities of multimodal intraoperative electroneurophysiology monitoring in spinal surgery cases/HUANG Lin, ZHAO Min, WANG Peng, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2015, 25(7): 594-601

【Abstract】Objectives: To analyze the causes of the abnormalities in intraoperative electroneurophysiology monitoring in spinal surgery, and to investigate the strategies for improving the monitoring success rate. Methods: A total of 476 cases of spinal surgery with multimodal intraoperative electroneurophysiology monitoring, including somatosensory evoked potential(SEP), transcranial electrical stimulation motor evoked potentials(MEP) and free-run electromyography(Free-run EMG), was analyzed retrospectively. Results: Abnormal waveforms were detected in 76 cases. Twenty-one of them had preoperative neurological disorders. Abnormalities in 8 cases were caused by iatrogenic nerve impairment. The other abnormalities were caused by inappropriate use of muscle relaxant(7 cases), inappropriate use of inhaled anesthetics(8 cases), lower limb muscle tremors(3 cases), electromagnetic field interference(4 cases), improper operative position(7 cases), incorrect link of electrode wires(7 cases) and unknown reasons(11 cases) respectively. Among the abnormal cases, twenty-eight returned to normal after effective intervention. Conclusions: Several aspects, including operation technique, anesthesia, electromagnetic environment and patient factors, should be taken into consideration for coping with monitor abnormalities. Positive and effective measures should be taken for better monitoring.

【Key words】Spinal surgery; Multimodal intraoperative neurology monitoring; Somatosensory evoked potential; Transcranial electrical stimulation motor evoked potentials; Free-run electromyography

【Author's address】Department of Orthopedics, Sun Yat-sen Memorial Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510120, China

基金项目:国家自然科学基金 NFSC-广东联合基金项目(编号:U1301223);国家自然科学基金面上项目(编号 81271951);卫生部公益性行业科研专项项目(编号 201002018)

第一作者简介:男(1978-),副主任医师,医学博士,研究方向:脊柱外科疾病的诊治

电话:(020)81332523 E-mail:drhuanglin@icloud.com

共同第一作者:赵敏 E-mail:800ivy@sina.com

通讯作者:沈慧勇 E-mail:shenh.y@163.com

术中神经电生理监测技术应用于不同类型的脊柱手术中,能有效监测脊髓神经功能的情况,可大大降低脊髓及神经损伤的风险。体感诱发电位(SEP)能反映脊髓后索感觉传导上行通路的完整性,运动诱发电位(MEP)则反映脊髓前索运动传导下行通路的完整性,自由肌电图(Free-run EMG)可反映神经根的情况^[1]。采用包括SEP、经颅电刺激MEP和Free-run EMG的多模式联合监测与单一模式监测相比,能更全面地反映脊髓及神经的功能,提高监测的敏感性和特异性^[2]。然而,多模式电生理监测由三个独立的诱发电位技术组成,其神经监测的操作技术要求较单一模式监测复杂,导致监测结果异常的原因也更为繁多。我院2012年9月~2015年4月,对476例脊柱手术患者术中使用多模式神经电生理监测,其中76例出现监测异常。本研究旨在分析监测异常的原因,探讨提高术中神经监测成功率的技术要点。

1 资料与方法

1.1 临床资料

本研究共纳入脊柱手术中进行神经电生理监测的患者共476例,男247例,女性229例;年龄 49.4 ± 17.8 岁(2~86岁)。脊柱退行性病变259例,脊柱肿瘤125例,脊柱畸形56例,脊柱创伤25例,脊柱感染11例。所有监测病例已排除有癫痫病史、安装心脏起搏器、颅内金属置入物或颅骨骨折等运动诱发电位禁忌证的患者。

1.2 监测方法

1.2.1 神经电生理监测仪器 美国尼高力Endeavor CR IOM16通道神经电生理监测仪,使用SEP、MEP、Free-run EMG联合监测系统。

1.2.2 SEP监测 使用针电极,根据国际脑电图10/20系统中C3'和C4'(C3和C4后2cm处)作为上肢监测记录位置,Fz为参考电极。使用鞍状电极作为刺激电极,刺激上肢正中神经,放置于腕褶部上方2~3cm处。下肢则以Cz或Cz'(Cz后2cm处)作为记录位置,Fz为参考电极,使用鞍状电极刺激下肢胫后神经,放置于跟腱与内踝之间。肩部三角肌位置放置接地电极。参数设置:刺激频率:2.1~4.7Hz;刺激强度:恒流刺激上肢20mA,下肢25~30mA;刺激间期:300 μ s;时间基线:上肢50ms,下肢100ms;信号平均叠加次数100次;滤波范围30~500Hz。术中间隔10min监测一次,在

手术关键步骤增加监测的频率。

1.2.3 MEP监测 使用螺旋电极,根据国际脑电图10/20系统中C3和C4作为刺激电极,彼此互为正负极和参考电极。使用双针电极置入肌腹中作记录电极,记录肌肉包括三角肌、肱二头肌、肱桡肌、拇短展肌、小鱼际肌、腹直肌、股外侧肌、胫前肌、踇长伸肌、踇收肌、肛门括约肌等。根据手术部位,选择手术部位以上的一组肌肉作为对照,手术部位以下可能损伤到的神经根所支配的多组肌肉作为监测。参数设置:刺激强度:恒压刺激200~400V;刺激间期:500 μ s;刺激方式:多脉冲刺激模式,系列刺激为7个/串;串刺激频率:500Hz。术中间隔30min监测一次,在手术关键步骤增加监测的频率。

1.2.4 Free-run EMG监测 监测MEP中肌肉的自发肌电情况。设置时间基线为2s。手术全程实时持续监测。

1.3 麻醉方法

手术过程采用全静脉麻醉(total intravenous anesthesia, TIVA),诱导时给予异丙酚1~2mg/kg,芬太尼3~5 μ g/kg,顺式阿曲库铵0.1~0.12mg/kg单次给药。诱导后异丙酚6~12mg/kg/h,盐酸瑞芬太尼0.1~0.5 μ g/kg/min,顺式阿曲库铵0.01~0.02mg/kg/min维持。镇静深度监测指标使用BIS/Narcotrend。

1.4 监测异常的标准

包括麻醉完成后,一种或一种以上监测方式无法获得可解读波形,以及麻醉完成后可获得可解读监测波形但手术过程中一种或一种以上监测波形出现异常,SEP波幅下降大于50%和/或潜伏期延长大于10%,MEP波幅下降大于80%^[2],自由肌电图持续出现动作电位。

2 结果

476例患者中,监测结果异常共76例,其中16例SEP监测异常,34例MEP监测异常,26例SEP和MEP同时监测异常,Free-run EMG无监测异常。

在76例患者中21例患者术前已经存在神经功能障碍,ASIA分级A级4例,B级5例,C级12例,SEP与MEP的监测均未能得出可解读的波形,调整各项诱发参数及电极位置后仍无效。

8例因手术因素导致中途出现监测异常,3例

因置钉位置不佳,1 例因切除肿瘤时脊髓受到挤压,1 例因手术操作原因导致脊髓受到震荡,1 例颈椎单开门后神经根受到牵拉,1 例因 cage 置入过深导致脊髓受压迫,1 例使用超声骨刀磨除椎板两侧双层骨皮质,使椎板完全离断后出现电位异常。2 例通过更换螺钉、使用激素等干预后电位恢复,且术后无出现神经症状;6 例术后出现神经功能损害症状,术后 2 周神经功能未恢复至术前水平。

因单次追加肌松药导致监测异常 7 例,其中有 5 例待肌松药代谢完毕,四联刺激肌肉收缩试验(train of four twitch test, TOF)值 >0.5 ,或使用肌松拮抗剂后能诱发(图 1)。其余 2 例 TOF 值至手术完毕仍未恢复至 0.5 以上,MEP 无法诱发,但术后患者未出现神经功能损害症状。

因使用浓度大于最低气泡有效浓度(minimum-alveolar concentration, MAC)吸入麻醉药 8 例,导致 MEP 无法诱发,停止使用吸入麻后 7 例能成功诱发(图 2)。其余 1 例至术毕 MEP 无法诱发,但术后患者未出现神经功能损害症状。

因术中发生肌颤下肢 SEP 监测异常 3 例,在加深麻醉深度及增加肌松剂静脉维持的浓度后,

均可得到 SEP 波形(图 3)。

因使用双极电刀产生电磁场干扰 4 例,停止使用干扰来源设备后成功监测(图 4)。

因患者体位摆放不当 7 例,其中包括俯卧位时上肢过度前伸、颈椎手术过度拉肩、髂骨取骨垫骹过高、肢体于术中意外悬空(图 5)、使用约束带固定过紧、肢体受到挤压等,在调整患者体位,保持肢体处于功能位及妥善固定后,4 例波形恢复。其余 3 例波形仍未能恢复。

因电极线连接问题 7 例,其中出现连线的错误、电极线离断、电极线脱落等问题,3 例通过重新连接、更换电极线、重置电极线后可诱发。其余 4 例因手术结束时发现电极线连接错误,监测过程中未采取干预措施。

不明原因 11 例,采取干预措施后仍无法监测。

所有监测异常患者中,28 例(36.8%)通过分析原因,积极采取有效可行的干预措施后,能成功监测。在 76 例监测结果异常的患者中,除去 21 例术前已出现神经功能障碍及 6 例因手术操作导致脊髓神经损伤外,其余 49 例患者均未出现神经功能损害症状。

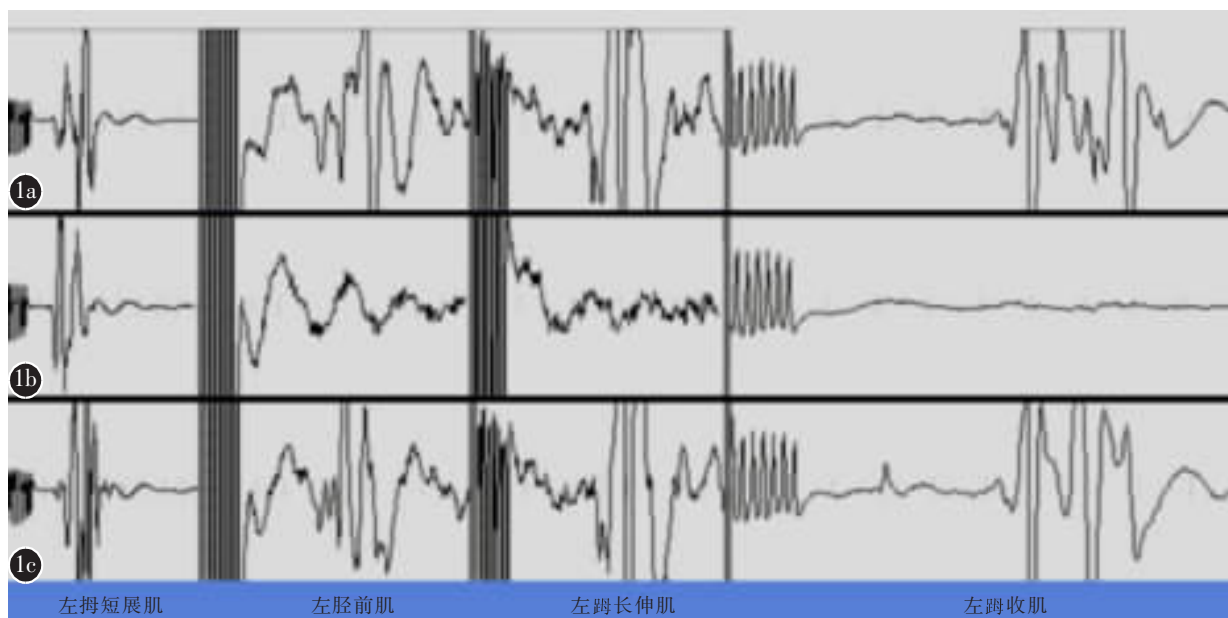


图 1 患者男,65 岁,腰椎间盘突出症行腰椎间盘摘除内固定术,术中 MEP 受单次追加肌松药影响的情况 a 给药前 MEP 诱发情况 b 单次追加 5mg 顺式阿曲库铵后,下肢 MEP 无法诱发 c 肌松药代谢后 MEP 可恢复

Figure 1 The intraoperative MEP monitoring of a 65-year-old male with lumbar disc herniation who was administered with additional muscular relaxant during lumbar discectomy and internal fixation a Pre-administration b The MEP of lower limbs could not be induced after the additional use of 5mg cis-Atracurium c The MEP monitoring returned to normal after the catabolism of muscular relaxant

3 讨论

3.1 SEP 操作要点

针电极适合应用于麻醉状态下的患者,因其定位较准确恒定,易于放置且不易脱落,手术过程中其阻抗不会有太大变化。电极的阻抗会影响生物电信号的记录质量,电极阻抗高会摄取更多的干扰信号,所以电极阻抗控制在 $5k\Omega$ 以下能得到较好的纪录效果。

下肢体感诱发电位的监测通常较上肢难度大,与上肢相比,下肢神经传导的通路要长得多,麻醉、电磁场等干扰对下肢刺激诱发的皮层电位影响更为显著。以老年人为例,老年人下肢周围神经的感觉电位较低^[3],对于患有糖尿病等可引起周围神经病变的老年患者,下肢的 SEP 监测在常规参数下难以诱发。此时,应调整各项参数以达到最佳诱发效果。刺激外周神经的最小电量应以能引起指端抽动为准,若无指端抽动则可考虑加大电量,但不超过 $50mA$,以免损伤外周神经。增加刺激的频率能够在更短时间内获得可解读的波形。增加信号叠加的次数,有利于集中记录与刺激有锁时关系的生物信号而削弱其他生物信号如心电、脑电信号的影响,从而得到更清晰易辨认的波形。

3.2 MEP 操作要点

MEP 的监测普遍采用螺旋电极作为头皮刺

激电极,因其具有固定良好,与头皮接触面积较针电极大等优点,能产生更佳的刺激效果^[4]。记录肌肉应选择表浅易定位且较易诱发出多相波形的肌肉。麻醉剂可作用于运动传导通路的各个部分,导致 MEP 的波幅降低,不能反映患者脊髓功能的真实情况,研究表明采用多脉冲刺激模式可部分对抗麻醉剂对 MEP 的抑制作用^[5]。

与 SEP 相比,MEP 的参数设定较简单固定,但诱发难度更大。当 MEP 无法监测成功时,可从以下几个方面考虑:(1)患者术前的肌力情况。有研究表明^[6],术前患者肌力与麻醉后 MEP 的检出率成正比,肌力正常者 MEP 检出率为 97.9%,肌力 3 级时仅为 7.4%,而肌力 2 级以下均无法检出。本组 21 例 ASIA 评分在 C 级以下的患者肌力均在 3 级或以下。所以术前应认真评估患者的肌力情况。(2)TOF 值。TOF 值可提示肌松药代谢情况,反映神经肌肉阻滞程度。当比值大于 0.5 可诱发 MEP^[7]。腰椎手术应包括下肢肌肉 TOF 值的监测。因为上肢 TOF 值要比下肢恢复得更快,下肢 TOF 值更真实地反映全身神经肌肉阻滞程度^[8]。(3)评估刺激的有效性。若肌力和 TOF 值均达到 MEP 诱发的标准,则需要考虑刺激和记录的有效性。MEP 的记录是通过针电极放置于靶肌肉的肌腹中记录肌电信号,操作并没有太大难度。MEP 通过螺旋电极刺激大脑的运动皮层引起全身肌肉

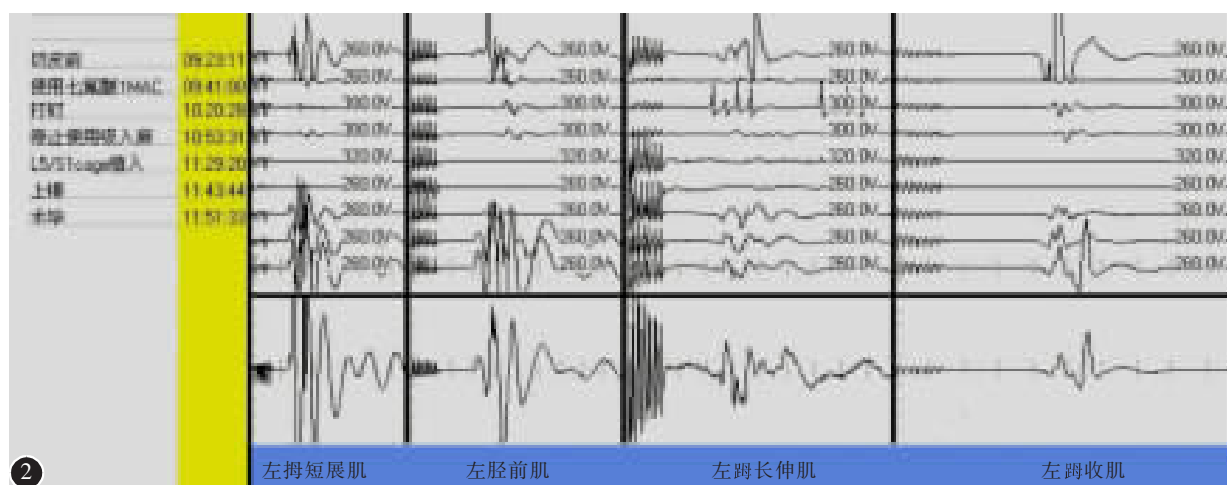


图 2 患者女,55 岁,腰椎间盘突出症行腰椎间盘突出内固定术,术中 MEP 监测受吸入麻影响的情况:MEP 监测在切皮前诱发良好,切皮开始后使用吸入麻七氟醚 1MAC,MEP 无法诱发,在停止使用吸入麻后,左下肢 MEP 可逐渐恢复

Figure 2 The intraoperative MEP monitoring of a 55-year-old female with lumbar disc herniation who was administered with inhaled anesthetics during lumbar discectomy and internal fixation. MEP could be induced obviously before skin incision. After incising the skin and administering with 1 MAC sevoflurane inhalation, MEP could not be induced. The MEP of left lower limb was recovered with the withdraw of inhaled anesthetics

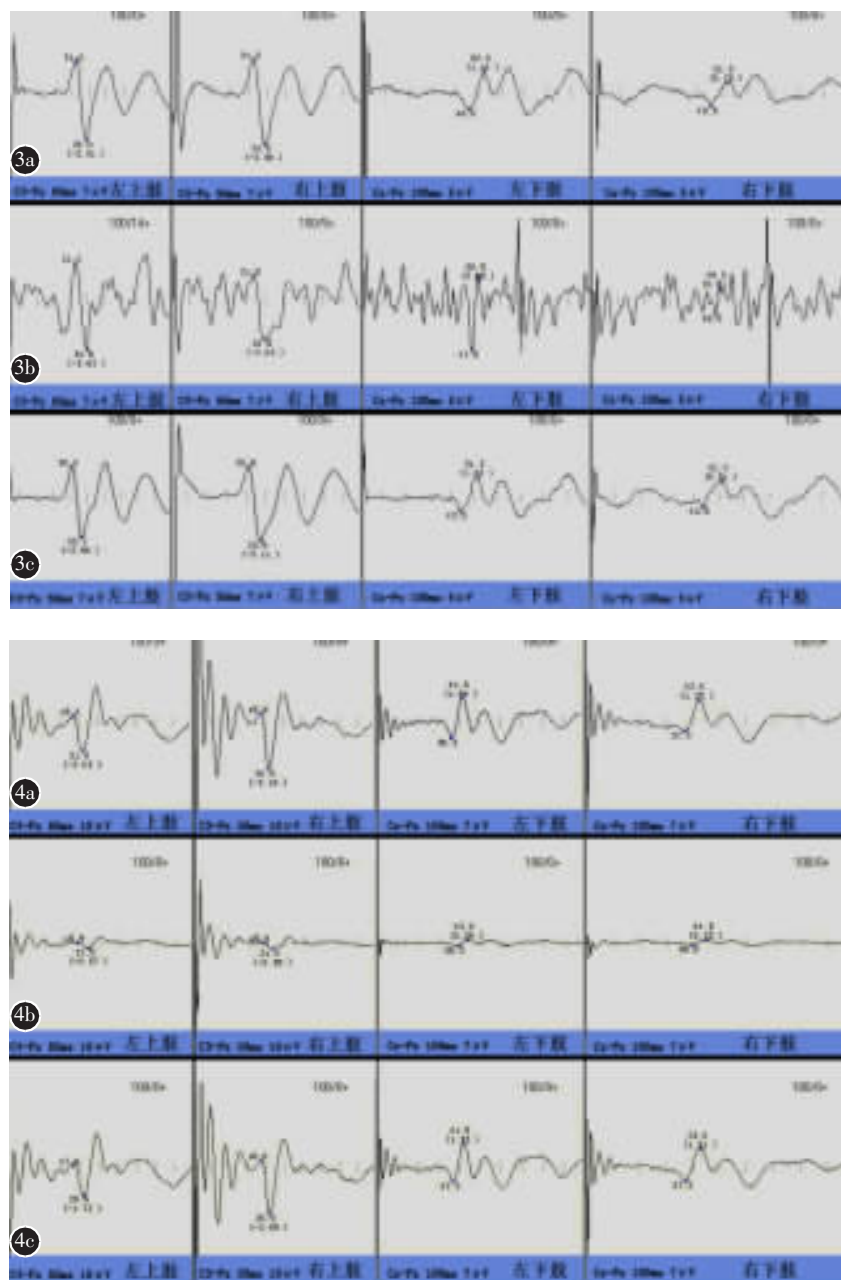


图 3 患者男, 67 岁, 腰椎转移瘤行腰椎椎体肿瘤姑息切除内固定术, 术中 SEP 受肌颤影响的情况 **a** 全身肌颤未出现时四肢 SEP 波形 **b** 全身肌颤产生时, 双下肢 SEP 不可辨认, 双上肢稍有干扰但仍可辨认 **c** 增加肌松药静脉维持浓度后, 波形恢复 **图 4** 患者女性, 77 岁, 退行性脊柱侧凸行脊柱侧凸矫形内固定术, 术中 SEP 受双极电刀干扰的情况 **a** 双极电刀开启前所得到 SEP 波形 **b** 双极电刀开启后 SEP 波形整体变平 **c** 关闭其中一部双极电刀后 SEP 波形恢复

Figure 3 A 67-years-old male patient received lumbar tumor palliative resection and internal fixation for lumbar metastasis. The intraoperative monitoring of SEP under the influence of muscular fibrillation was showed below **a** The SEP wave of limbs without the influence of muscular fibrillation **b** When muscular fibrillation occurred, the SEP wave of lower limbs could not be recognized, while the SEP wave of upper limbs could still be identified even though the interference existed **c** After the additional use and concentration maintaining of muscle relaxant, the SEP wave was recovered **Figure 4** The SEP of a 77-year-old female with degenerative scoliosis was monitored during the scoliosis orthomorphia when two electrostimulation hosts were used simultaneously **a** The waveform of SEP monitoring before the turn on of two electrostimulation hosts **b** The waveform of SEP monitoring turned smooth after the turn on of two electrostimulation hosts **c** The waveform of SEP monitoring was recovered after turning off one of the electrostimulation hosts



图5 患者男,32岁,脊柱侧凸畸形行脊柱侧凸矫形内固定术,术中肢体离床悬空引起的 MEP 变化 a 左下肢 MEP 波形 b 术中左下肢意外离床悬空,导致左侧腓收肌电位消失,下肢其余肌肉 MEP 波幅下降 c 此时右下肢 MEP 诱发良好 d 将左下肢妥善固定后 MEP 波形恢复

Figure 5 A 32-years-old male patient received scoliosis surgery. The intraoperative MEP was monitored under the influence of limbs dangling from bed **a** The MEP waveform of left lower limb **b** As indicated by the red arrow, the electric potential of left thumb adductor disappeared and the MEP amplitude of other lower limb muscles decreased after the left lower limb dangling from bed by accident **c** At that time, the MEP waveform of right lower limb was unaffected **d** The MEP waveform of left lower limb was recovered after fixing the left lower limb

收缩反应,理论上讲,可以在身体任何部位接收到诱发电位的信号^[9]。如果 MEP 仅能诱发单侧肢体,应调整螺旋电极的位置避免偏移,准确定位 C3、C4 的位置,两者间隔 10cm。若没有任何一块肌肉能记录到电位信号,在置放电刺激时观察患者有否产生身体的抖动。保证螺旋电极的完整性,在电

极放置于头皮时,螺旋金属与电极线连接处容易被扭断,可通过检测螺旋电极的阻抗来确保其完整性。当阻抗 $>30\text{k}\Omega$,反映电极线可能已离断。

3.3 麻醉的因素

麻醉方案应在满足监测、有利于术者操作和保证患者术中安全三方面取得平衡。为了不影响

MEP的记录,学者们建议进行诱导插管后不再使用肌松药^[10,11],插管后单次追加肌松药会导致 MEP 电位消失。本组中,3 例患者在手术开始初可诱发出可解读波形,手术过程中双下肢 SEP 出现持续非一过性的不可辨认波形,双上肢 SEP 稍有干扰但仍可辨认。在排查手术因素和电磁场干扰因素后,发现患者出现全身肌肉颤动。在适当增加肌松药的静脉维持量后,都能重新获得可解读波形。这是由于肌松剂对于由头皮记录的 SEP 无直接影响,反而可以抑制肌肉收缩所产生的杂波来提高 SEP 的记录质量^[12]。有学者指出在部分神经肌肉阻滞状态下,MEP 仍可被诱发^[3]。本研究所使用的麻醉方案为手术中肌松药低剂量静脉维持,不但不会影响 MEP 的诱发效果,还有利于 SEP 的监测和术者的操作。

吸入麻醉对大脑皮层的作用首先表现为抑制,当达到一定深度即能产生肌松作用^[13]。大部分学者认为当吸入麻醉浓度小于 1MAC 时,不会影响 MEP 的监测^[14],但有学者则表示浓度控制在 0.5MAC 以下影响更小^[15]。本组数据显示,使用浓度大于 1MAC 的七氟醚会导致 MEP 诱发不成功,在停止使用后可成功诱发。在吸入麻醉下,上肢 MEP 诱发的成功率远高于下肢^[16],使用吸入麻醉的 MEP 假阳性率较全静脉麻高^[17]。综合以上观点,手术中应控制吸入麻的浓度或尽量避免使用。

3.4 手术因素

椎弓根螺钉置入、颈椎手术单开门掀开椎板、椎间融合器置入、截骨矫形等高危手术操作都可导致脊髓损伤。如果诱发电位信号异常与高危手术操作同步出现,且存在合理相关关系,在调整参数后多次反复刺激仍无变化,提示存在脊髓损伤的可能^[18]。本组 8 例患者因手术操作引起脊髓神经损伤,导致监测异常,其中 2 例通过更换螺钉、激素冲击等干预后波形恢复,术后未出现神经功能障碍。其余 6 例术后出现神经功能损伤。

3.5 电磁场干扰因素

电场及磁场干扰在手术室环境中无处不在,手术室内任何机器包括电刀电凝机、血液回收器、麻醉机甚至是手术床都能成为电磁场干扰的来源。应避免头部体表诱发电位记录线悬空产生“天线”效应,导致更易接收外界电磁干扰,可把记录线盘起或者编辫使其变短,远离其他设备和电源线^[19]。正在使用的电刀机可对诱发电位产生干

扰,这一观点得到大部分学者的认同^[20]。有学者报道电刀机即使停止使用,仍有持续影响 SEP 的作用^[21],处于开启状态,亦可以产生干扰^[19]。本组数据中 4 例在切皮后 SEP 波形整体消失。在排除其他方面的因素后,将所有电子仪器逐一关闭并观察 SEP 的诱发情况,最终发现干扰来自于两部同时开启的电刀机,关闭其中一部后即可重新获得 SEP 波形。有条件的医疗单位,可固定室间进行需要神经电生理监护的脊柱手术。固定室间有利于监测者了解其电磁场环境是否适合神经生理监测,室间里的电器设备也相对固定,若使用新增仪器而出现干扰信号则很容易被发现。尽量使电子设备远离患者也能减少干扰进入患者体内。

3.6 其他因素

术中应注意患者是否处于适当的体位,保证肢体处于功能位及妥善固定。例如本组患者中,1 例因固定欠妥,术中左下肢意外离床悬空导致该侧踝收肌运动电位消失,下肢其余肌肉 MEP 波幅下降。在妥善固定后,左下肢 MEP 波形恢复。除此之外,确保所有电极线正确且有效连接。在手术开始后,放置在患者身上的电极线难以调整,所以手术开始之前应保证电极线妥善固定且连接正确。若手术过程中怀疑某一电极线脱落但无法直接观察时,可通过测量电极线的阻抗,若阻抗 $>30\Omega$,则表示线已脱落或并未连接到机器上。

尽管早在 20 世纪 70 年代诱发电位就被应用于脊柱手术中,但由于缺乏规范系统的操作培训,在我国并没有得到很好的发展。监测信号不稳定、操作方法不规范令监测结果的准确性大打折扣。脊柱外科手术中神经电生理监测除了要有神经生理学、电生理学和电子学的综合知识外,还需要进一步学习脊柱外科手术、麻醉学等相关知识。与此同时,由操作技术、麻醉、电磁场环境、患者因素等多方面分析监测异常的原因,在大量的临床实践中总结经验,有助于提高术中神经监护的准确性和全面性。

4 参考文献

1. 王珏. 多模式神经电生理在脊柱手术中的监护应用[J]. 现代电生理学杂志, 2014, 21(1): 43-47.
2. Bhagat S, Durst A, Grover H, et al. An evaluation of multi-modal spinal cord monitoring in scoliosis surgery: a single centre experience of 354 operations [J]. Eur Spine J, 2015, <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-015-3766-8>(Epub)

3. 鲁祖能, 曾庆杏. 实用肌电图学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2000. 136.
4. Sekimoto K, Nishikawa K, Ishizeki J, et al. The effects of volatile anesthetics on intraoperative monitoring of myogenic motor-evoked potential to transcranial electrical stimulation and on partial neuromuscular blockade during propofol/fentanyl/nitrous oxide anesthesia in humans [J]. *Neurosurg Anesthesiol*, 2006, 18(2): 106–111.
5. Kawaguchi M, Sakamoto, Ohnishi H, et al. Intraoperative myogenic motor evoked potentials induced by direct electrical stimulation of the exposed motor cortex under isoflurane and sevoflurane[J]. *AnesthAnalg*, 1996, 82(3): 593–599.
6. 陈裕光, 万勇, 杨军林, 等. 脊柱手术中经颅电刺激运动诱发电位监护的应用探讨[J]. *中国骨与关节外科*, 2009, 2(1): 12–17.
7. 张玉新, 何帆, 王珏. 多模式神经电生理监测在脊柱手术中报警因素分析[J]. *现代电生理学杂志*, 2014, 21(4): 199–203.
8. Gavranic B, Lolis A, Beric A. Author information. Train-of-four test in intraoperative neurophysiologic monitoring: differences between hand and foot train-of-four[J]. *J Clin Neurophysiol*, 2014, 31(6): 575–579.
9. 周琪琪, 张小峰. 神经监测技术在临床手术中的应用[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2005. 49.
10. Kim WH, Lee JJ, Lee SM, et al. Comparison of motor-evoked potentials monitoring in response to transcranial electrical stimulation in subjects undergoing neurosurgery with partial vs no neuromuscular block [J]. *Br J Anaesthesia*, 2013, 110(4): 567–576.
11. Choi I, Hyun SJ, Kang JK, et al. Combined muscle motor and somatosensory evoked potentials for intramedullary spinal cord tumour surgery[J]. *Yonsei Med J*, 2014, 55(4): 1063–1071.
12. 胡勇, 沈慧勇. 脊柱外科手术中神经电生理监护[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2015. 46.
13. 石磊, 邓忠良. 肌电图监测在腰椎手术中的应用[J]. *重庆医学*, 2013, 42(28): 3450–3452.
14. 张玉龙, 角述兰. 运动诱发电位与麻醉的研究进展[J]. *临床麻醉学杂志*, 2013, 29(7): 718–720.
15. 王凌雁, 窦云凌, 张恒. 部分神经肌肉阻滞及不同麻醉深度对经颅电刺激运动诱发电位的影响 [J]. *中华神经外科杂志*, 2011, 27(8): 828–831.
16. Shida Y, Shida C, Hiratsuka N, et al. High-frequency stimulation restored motor-evoked potentials to the baseline level in the upper extremities but not in the lower extremities under sevoflurane anesthesia in spine surgery [J]. *J Neurosurg Anesthesiol*, 2012, 24(2): 113–120.
17. Tamkus AA, Rice KS, Kim HL. Differential rates of false-positive findings in transcranial electric motor evoked potential monitoring when using inhalational anesthesia versus total intravenous anesthesia during spine surgeries[J]. *Spine J*, 2014, 14(8): 1440–1446.
18. 庄乾宇, 王树杰, 仇建国, 等. 经颅电刺激运动诱发电位监测标准化方案在 1543 例脊柱畸形矫形手术的应用[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2015, 8(1): 27–31.
19. Aage R. Møller. 术中神经电生理监测[M]. 窦万臣. 北京: 人民卫生出版社, 2009. 227–229.
20. 颜益红, 张长杰, 刘汉良. 诱发电位在脊柱矫形术中的应用及电位变化原因[J]. *中国康复理论与实践*, 2012, 18(10): 941–943.
21. 邵西仓, 李晓裔, 李璐, 等. 高频电刀对术中监护下肢体感诱发电位的影响 [J]. *中华神经外科杂志*, 2010, 26 (12): 1106–1108.

(收稿日期:2015-05-05 末次修回日期:2015-06-15)

(英文编审 郑国权/贾丹彤)

(本文编辑 卢庆霞)