

· 综述 ·

脊柱外科领域的神经电生理监测

贾强 李玉兰

术中神经电生理监测(intraoperative neurophysiological monitoring, IONM)是在手术过程中连续监测神经功能的一项技术,在脊柱外科用以识别和减少术中可能发生的脊髓及神经根损伤。20 世纪 70 年代末, Møller 等^[1]首次记录了脊柱侧凸手术中的体感诱发电位(somatosensory evoked potentials, SSEP),证明 IONM 可以减少脊髓的损伤。此后,包括 SSEP 在内的 IONM 技术因可连续、实时反映术中脊髓及脊神经根功能状态的特点,广泛应用于脊柱外科领域,本文就该技术应用近 10 年的发展概况进行综述。

IONM 技术

SSEP SSEP 作为 IONM 技术中最基本的方法,广泛应用于评价术中脊髓感觉功能通路的完整性。SSEP 最早被用于脊柱侧凸矫形手术,监测脊髓后束-内侧丘系通路功能的完整性。此通路是人体精细触觉、振动觉、本体感觉、方位觉及协调肌肉运动感觉的传入通路。具体方法是在头皮放置记录电极,通过电刺激周围神经,记录由特定脊神经节段和脊神经根支配的皮肤区域产生的波形,即 SSEP。

SSEP 具有无创、方便、可与其他监测技术合用的优点。Thirumala 等^[2]回顾了 15 项包含 4 763 例青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)手术病例的研究显示:SSEP 敏感度平均为 84%(95%CI 59%~95%);特异度平均为 98%(95%CI 97%~99%),Meta 分析得出 SSEP 阳性患者脊髓损伤致神经功能障碍的危险性是阴性患者的 340 倍。SSEP 的缺点包括:易受麻醉因素影响;受低体温及周围神经病变(如糖尿病周围神经病变)的影响;监测不到脊髓下行运动通路功能的完整性。SSEP 警戒标准为波形下降幅度>50%、波形延迟出现>10%。

神经源性诱发电位(neurogenic mixed evoked potentials, NMEP) NMEP 是从暴露的脊髓或邻近脊髓部位直接记录到的诱发电位,即从脊髓的一个部位进行刺激,另一个部位进行记录;反映脊髓感觉通路和部分运动功能。一般联合 SSEP 用于监测术中脊髓感觉功能通路的完整性,特别是当 SSEP 受到混杂因素干扰、不易获得时,可作为评价神经感觉功能的辅助参考指标。

NMEP 的优点是所记录的波形较 SSEP 波幅更大、出现速度更快,基本不受麻醉因素的影响。Kundnani 等^[3]分析

了 354 例 AIS 手术患者,术中采用 SSEP、NMEP 联合监测,结果表明 SSEP 的特异性(100%)高于 NMEP(96%);NMEP 的敏感性(100%)远优于 SSEP(51%)。NMEP 的缺点在于监测有创并侵占手术视野,因其仅反映部分脊髓运动功能,特异性存疑。NMEP 目前尚无统一的警戒标准,可参考 SSEP 警戒标准。

运动诱发电位(motor evoked potentials, MEPs)

MEPs 用于监测皮质脊髓束通路,评价脊髓下行运动通路功能的完整性,对于脊髓机械刺激及缺血状态十分敏感。早期因 MEPs 对麻醉敏感,应用受到限制。多脉冲电刺激技术和全凭静脉麻醉的应用最大限度地提高了 MEPs 的监测效能,现 MEPs 常与 SSEP 联合监测术中脊髓感觉、运动功能的完整性。目前最常使用的 MEPs 是经颅电刺激运动诱发电位(transcranial electric motor evoked potentials, TceMEPs),即经颅电刺激,于 C₁、C₂ 椎体前放置螺旋刺激电极,记录电极置于上肢或下肢肌群,记录到的波形即 TceMEPs。

TceMEPs 的优点是无创、实施方便,可与其他监测技术联合使用。Kothbauer^[4]对 1996~2002 年大约 300 例脊柱肿瘤手术患者的研究结果表明,TceMEPs 敏感度为 100%,特异度为 90%。TceMEPs 的缺点在于波幅较小,不易观察、易受麻醉因素影响且可能诱发术中知晓及癫痫发作。TceMEPs 目前无统一的警戒标准。一般在麻醉诱导后开始监测,此时的 TceMEPs 波形作为基线,如出现波形形态改变、波形振幅下降,特别是波形下降幅度>50%可作为次级警戒标准;如波形完全消失应作为警戒。Zhuang 等^[5]回顾研究了 1 162 例脊柱畸形手术患者,建议如 TceMEPs 波形幅度下降幅度>80%,且进行了高风险的相关手术操作,在排除全身和麻醉因素影响的情况下,可引起警戒。

D 波(Direct-Wave, D-Wave) 与 TceMEPs 的产生机制类似,于 C₁、C₂ 椎体前放置螺旋刺激电极,将记录电极放置于脊髓硬脊膜外,可记录到两种波形,即 D 波和 I 波。D 波由直接刺激皮质脊髓束引起,反映脊髓下行运动通路功能的完整性,常用于监测脊髓运动功能及神经根功能完整性,常与 SSEP、TceMEPs 联合使用。I 波目前被认为是由间接刺激皮质脊髓侧束引起,应用较少。D 波因监测电极直接位于脊髓硬脊膜外,对脊髓运动功能完整性的监测较 TceMEPs 更具特异性,并可通过改变刺激电极位置来判断脊髓损伤水平。D 波缺点在于监测有创,并侵占手术视野,目前尚无统一的警戒标准,可参考 TceMEPs 警戒标准。

肌电图 (electromyography, EMG) EMG 是记录肌肉静止或收缩时的电活动及应用电刺激检查神经、肌肉兴奋及传导功能的方法。

(1) 自发肌电图 (spontaneous electromyography, sEMG): 是将记录电极放在神经根支配的相应肌肉上, 手术操作时对神经根的牵引、拉伸、压迫使神经兴奋放电并传至肌肉, 被电极测量并记录。如果波形出现频率增高或者振幅加大, 就需结合手术来判断有无神经根损伤。术中电刀、麻醉药的应用, 以及神经肌肉系统疾病如重症肌无力、肌营养不良等可明显干扰肌电信号的采集。

(2) 触发肌电图 (triggered electromyography, tEMG): 是利用恒压或恒电流源刺激置入椎弓根内的螺钉, 使对应节段的神经所支配肌肉被同步激活产生动作电位, 从而被电极测量并记录。在经椎弓根脊柱内固定术中, tEMG 可用来监测椎弓根螺钉是否突破了椎管。如螺钉位置正确, 因四周是绝缘的骨性结构, 故需加大电流量刺激神经根, 一般用单电极直接刺激椎弓根螺钉的顶部来加大电流, 使测量电极记录到相关数据。术中功能受损的神经根会有更高的触发阈值, 一般为 6~10 mA, 而正常的神经根一般只有 2 mA^[6]。

sEMG 常用于监测脊神经根功能, tEMG 则常用于监测椎弓根内固定术中可能发生的神经损伤。Kelleher 等^[7]回顾了 5 年内 1 500 例颈椎手术, 采用 EMG 监测, 其敏感度为 46%、特异度为 73%、阳性预测率为 3%, 阴性预测率为 97%。因 EMG 敏感度、特异度较差, 一般不单独用于术中监测, 需与其他电生理监测方法联合应用。EMG 的优点在于可提供术中多途径实时、动态监测信息; 其缺点在于敏感度、特异度较差, 监测信息不可回溯, 需要连续观察, 并排除肌肉自主活动所致的波形变化。EMG 警戒标准: 当术中 EMG 波形频率增高、振幅加大、触发阈值增高时, 应结合手术过程及其他监测指标综合判断。

唤醒试验 (stagnara wake up test) 唤醒试验最早是针对全麻手术患者, 在手术中降低麻醉深度并采取捏耳垂、拍打背部、脸部等方式唤醒患者, 以防因唾液等分泌物导致患者窒息的方法。1973 年法国医师 Vauzelle 等^[8]首次报道了术中应用唤醒试验来监测脊髓功能的方法, 即术中使患者清醒, 询问患者感觉并嘱其配合医师做一些动作。虽然唤醒时患者无痛感、无记忆, 但唤醒试验明显延长手术时间, 且无法连续监测神经功能, 对于听力、认知障碍以及患有重症肌无力等神经肌肉病变的患者, 应用受到限制。对于那些神经电生理参数无法获得的特殊病例, 或神经电生理参数出现异常需鉴别诊断者, 唤醒试验仍为评估脊髓功能的有效方法。

不同脊柱手术中的 IONM

IONM 技术各有其优缺点及适用范围, 在脊柱手术过程中一般采用联合监测以提高监测效能。尤其在困难脊柱手术中, 多模式 IONM 已经成为现代脊柱外科一种标准化

的监测手段。

脊柱侧凸畸形矫正术 脊柱矫正手术涉及多个椎体的矫正, 包括半椎体、蝴蝶椎等不规则椎体, 手术难度极大, 术中医源性脊髓损伤风险极高。SSEP 反映脊髓感觉功能完整性, TceMEPs 反映脊髓运动功能完整性, 脊柱侧凸畸形矫正术中一般采用两者联合监测。Ferguson 等^[9]回顾了 2007~2010 年接受脊柱畸形矫正术的 519 例患儿, 采用 SSEP、TceMEPs 联合监测, 其敏感度为 100%、特异度为 92%、阴性预测值为 100%、阳性预测值为 8.5%, 肯定了 IONM 的价值。Bhagat 等^[10]回顾了 2003 年 7 月至 2013 年 10 月 345 例成人脊柱侧凸畸形矫正手术, 采用 SSEP、TceMEPs 联合监测, 联合敏感度为 100%、特异度为 99.3%, 认为术中采用两者联合监测应作为复杂脊柱矫正手术术中监护的金标准。

髓内肿瘤切除术 在髓内肿瘤切除术中, 最大限度切除肿瘤并保护脊髓是一项具有挑战性的工作。术中一般采用 SSEP 监测脊髓感觉通路功能; TceMEPs、D-Wave 联合监测脊髓运动通路功能; D-Wave、EMG 联合监测脊神经根功能。Sala 等^[11]研究了 423 例髓内肿瘤切除术患者, 肯定了 TceMEPs 联合 D-Wave 监测脊髓运动功能的价值, 并建议将其作为髓内肿瘤切除术中监测脊髓运动通路功能的标准方法。Scibilia 等^[12]回顾了 1998~2014 年 12 项髓内肿瘤的相关研究, 共 1 075 例行髓内肿瘤切除术患者, 采用 TceMEPs、D-Wave、SSEP 及 EMG 联合监测, 联合监测敏感度为 100%, 特异度为 99%, 阳性预测值为 96%, 阴性预测值为 100%, 监测效能满意。

颈椎手术 C₅ 神经根麻痹是颈椎减压术的常见并发症, 在颈椎前路手术中发生率为 12%, 后路手术发生率为 30%。Bose 等^[13]回顾了 238 例颈椎前路手术患者, 认为单独应用 EMG 监测 C₅ 神经根假阴性率过高, 单独使用 SSEP 监测则敏感度欠佳, 建议采用 EMG、SSEP、TceMEPs 联合监测。在颈椎减压术后, 如颈部体位不当也可引起脊髓损伤; Bello 等^[14]研究了 75 例颈椎减压手术患者, 采用 SSEP、TceMEPs、sEMG 联合监测, 认为术中及术后采用多模式 IONM 监测可有效避免因颈部体位不当导致的脊髓损伤, 并强调 TceMEPs 在监测脊髓机械损伤方面的敏感度 (100%) 明显优于 SSEP (40%)。

其他困难脊柱手术

脊髓拴系综合征 (tethered cord syndrome, TCS) TCS 是因脊椎管发育异常、脊髓异常拉伸、脊髓末端血液循环障碍从而导致一系列临床神经受损的罕见综合征。松解治疗可达到减轻症状和防止病情进展的双重效果。Beyazova 等^[15]研究了 10 例 TCS 手术患者, 术中采用 IONM (SSEP、TceMEPs、sEMG) 监测, 在手术松解过程中对怀疑有神经结构的组织采用直接神经根刺激法可帮助区分组织成分, 避免神经损伤。

唐氏综合征 (Down syndrome, DNS) DNS 是由 21 号

染色体异常而导致的先天性疾病,部分 DNS 患儿因颈椎不稳定需要行颈椎内固定手术。Patel 等^[16]分析了 6 例术中采用 SSEP 和 TceMEPs 监测的 DNS 患儿,认为尽管 IONM 指标的变化可能与术中损伤无关,而是患儿本身异常的生理状态所致,但是仍建议对于此类特殊患儿常规采取 IONM 监测,并分析每一个 IONM 监测指标异常变化的原因。

先天性结缔组织发育不全综合征(Ehler-Danlos syndrome, EDS) EDS 指有皮肤和血管脆弱,皮肤弹性过强、关节活动过大 3 种主要表现的一组罕见遗传性疾病。EDS 患者脊髓周围血管系统十分脆弱,脊柱手术时损伤脊髓风险极大。Jahangiri 等^[17]报道了 1 例 16 岁男性 EDS 患儿,因背部畸形、脊柱后凸畸形需行椎体切除、椎弓根钉棒系统内固定手术,术中采用 SSEP 联合 TceMEPs 监测,手术过程中 TceMEPs 波形消失,SEEP 波形幅度降低,立即给予对症治疗并终止手术。术后患儿双侧下肢不能移动,24~36 h 后 T₈ 以下感觉、运动功能丧失;48 h 后 T₁₀ 水平感觉功能逐渐恢复;1 周后肛门括约肌功能恢复;4 周后髋部屈肌功能开始恢复。推测对于 EDS 需行脊柱矫形手术的患者,术中采用 IONM 监测可早期识别术中医源性脊髓损伤。

IONM 期间的麻醉管理

IONM 期间麻醉医师需要考虑不同麻醉方式对各类神经电生理监测的影响。生理稳态的变化、麻醉方式及药物的选择都可能影响神经功能,使电生理监测结果被误诊为医源性脊髓损伤。这些生理变化包括低体温、贫血、组织缺氧和电解质紊乱等^[18]。Deiner 等^[19]研究表明,高血压及糖尿病是导致电生理监测失败的独立危险因素,体重、年龄的影响则比较轻微,建议麻醉医师掌握基本的电生理监测技术及机制,以便选择适宜的麻醉方法,调节患者生理状态,以优化监测效能,保证患者术中安全。

吸入麻醉药严重干扰 IONM 的监测结果。Wang 等^[20]研究表明, N₂O 及卤素类药物对 MEP 影响呈现剂量依赖性,低剂量(0.5 MAC)的吸入麻醉药就可阻止诱发电位产生,进而使术者监测不到 MEPs 波形的改变,故建议对需要 IONM 者避免使用吸入麻醉。

全凭静脉麻醉(total intravenous anesthesia, TIVA)的采用极大地减少了吸入麻醉药的使用,如:阿片类药物对感觉、运动的影响很轻微;大剂量丙泊酚虽可抑制 MEPs,但因停药后诱发电位可迅速恢复且该药代谢较快,常用于 IONM;硫喷妥钠、咪达唑仑对 MEPs 抑制作用持久,一般不用于 IONM。Wang 等^[20]研究表明 N-甲基-D-天冬氨酸受体拮抗药可增强诱发电位的波幅;右美托咪定可减少丙泊酚的使用剂量而使 IONM 受益,建议在 TIVA 中作为辅助用药^[21]。神经肌肉阻滞药抑制神经肌肉接头,阻碍了 MEPs 及 EMG 的监测,应尽量避免,对于部分需要肌肉松弛的患者,可采用强直后 MEPs 新技术,即向周围神经施加强直刺激增强传统 MEPs 波形^[18]。Sala 等^[11]建议在 TIVA 过程

中,丙泊酚(一般剂量 100~150 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)及芬太尼(一般剂量 1 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)应恒速滴注;在监测或手术关键阶段应尽量避免药物浓度的变化及冲击量治疗干扰 IONM 波形。

小 结

外科手术的精细化对麻醉及监测提出了新的挑战。脊柱外科需要术前完备的计划和术中适当电生理监测。出现监测警报时,麻醉医师、手术医师应充分交流、密切合作,根据实际情况做出判断并调整麻醉及手术策略,才能减少和避免医源性脊髓损伤的发生。在可预见的未来,多模式 IONM 作为一种连续、实时的监测手段,将会应用于大部分脊柱手术的监测,尤其适用于困难、复杂的脊柱手术;多模式 IONM 是目前早期识别术中医源性脊髓损伤最有效的方法。

参 考 文 献

- [1] Møller AR. Introduction//Møller AR. Intraoperative neurophysiological monitoring. 2nd ed. Springer Science & Business Media, 2007: 2.
- [2] Thirumala PD, Cheng HL, Loke YK, et al. Diagnostic accuracy of somatosensory evoked potential monitoring during scoliosis fusion. J Clin Neurosci, 2016, 30: 8-14.
- [3] Kundnani VK, Zhu L, Tak HH, et al. Multimodal intraoperative neuromonitoring in corrective surgery for adolescent idiopathic scoliosis: Evaluation of 354 consecutive cases. Indian J Orthop, 2010, 44(1): 64-72.
- [4] Kothbauer KF. Intraoperative neurophysiologic monitoring for intramedullary spinal-cord tumor surgery. Neurophysiol Clin, 2007, 37(6): 407-414.
- [5] Zhuang Q, Wang S, Zhang J, et al. How to make the best use of intraoperative motor evoked potential monitoring? Experience in 1162 consecutive spinal deformity surgical procedures. Spine (Phila Pa 1976), 2014, 39(24): E1425-E1432.
- [6] Gonzalez AA, Jeyanandaran D, Hansen C, et al. Intraoperative neurophysiological monitoring during spine surgery: a review. Neurosurg Focus, 2009, 27(4): E6.
- [7] Kelleher MO, Tan G, Sarjeant R, et al. Predictive value of intraoperative neurophysiological monitoring during cervical spine surgery: a prospective analysis of 1055 consecutive patients. J Neurosurg Spine, 2008, 8(3): 215-221.
- [8] Vauzelle C, Stagnara P, Jouvinroux P. Functional monitoring of spinal cord activity during spinal surgery. Clin Orthop Relat Res, 1973, (93): 173-178.
- [9] Ferguson J, Hwang SW, Tataryn Z, et al. Neuromonitoring changes in pediatric spinal deformity surgery: a single-institution experience. J Neurosurg Pediatr, 2014, 13(3): 247-254.
- [10] Bhagat S, Durst A, Grover H, et al. An evaluation of multimodal spinal cord monitoring in scoliosis surgery: a single

- centre experience of 354 operations. *Eur Spine J*, 2015, 24 (7): 1399-1407.
- [11] Sala F, Bricolo A, Faccioli F, et al. Surgery for intramedullary spinal cord tumors: the role of intraoperative (neurophysiological) monitoring. *Eur Spine J*, 2007, 16 Suppl 2: S130-S139.
- [12] Scibilia A, Terranova C, Rizzo V, et al. Intraoperative neurophysiological mapping and monitoring in spinal tumor surgery: sirens or indispensable tools? *Neurosurg Focus*, 2016, 41(2): E18.
- [13] Bose B, Sestokas AK, Schwartz DM. Neurophysiological detection of iatrogenic C-5 nerve deficit during anterior cervical spinal surgery. *J Neurosurg Spine*, 2007, 6(5): 381-385.
- [14] Bello JP, Pérez-Lorensu PJ, Roldán-Delgado H, et al. Role of multimodal intraoperative neurophysiological monitoring during positioning of patient prior to cervical spine surgery. *Clin Neurophysiol*, 2014, 126(6): 1264-1270.
- [15] Beyazova M, Zinnuroglu M, Emmez H, et al. Intraoperative neurophysiological monitoring during surgery for tethered cord syndrome. *Turk Neurosurg*, 2010, 20(4): 480-484.
- [16] Patel AJ, Agadi S, Thomas JG, et al. Neurophysiologic intraoperative monitoring in children with Down syndrome. *Childs Nerv Syst*, 2013, 29(2): 281-287.
- [17] Jahangiri FR, A Eissa S, Sayegh S, et al. Vertebral column resection for kyphoscoliosis in a patient with ehlers-danlos syndrome: an intraoperative neurophysiological monitoring alert. *Cureus*, 2016, 8(8): e759.
- [18] Sloan TB, Jameson L, Janik D. Evoked Potentials// Cottrell JE, Young WL. Cottrell and Young's Neuroanesthesia. 5th ed. Elsevier Health Sciences, 2010: 115-131.
- [19] Deiner S. Highlights of anesthetic considerations for intraoperative neuromonitoring. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth*, 2010, 14(1): 51-53.
- [20] Wang AC, Than KD, Etame AB, et al. Impact of anesthesia on transcranial electric motor evoked potential monitoring during spine surgery: a review of the literature. *Neurosurg Focus*, 2009, 27(4): E7.
- [21] 郭余大, 戴寒英, 周小平, 等. 右美托咪定用于运动诱发电位监测神经外科手术患者的安全性和可行性. *临床麻醉学杂志*, 2016, 32(5): 434-437.

(收稿日期: 2017-05-30)

· 综述 ·

肺结节手术中非气管插管胸腔镜的麻醉管理

罗梦思 黄冠江 徐国海 吴论

肺结节是一种肺部病因未明的肉芽肿性疾病, 其直径 < 3 cm, 并且完全被肺实质包围^[1]。临床上, 患者做胸片检查后偶然发现肺结节的概率为 $0.1\% \sim 0.2\%$ ^[2, 3]。目前, 鉴别诊断肺结节的检查包括柔性支气管镜检查、痰细胞学检查、纤维支气管镜活检、CT 引导经皮细针抽吸活检、高分辨率 CT 和正电子发射断层扫描等^[2, 4, 5]。在无法明确诊断的情况下, 手术是唯一的选择, 且能同时提供诊断和治疗。

近年来, 随着微创胸外科手术方法和麻醉技术的蓬勃发展, 非气管插管胸腔镜为肺结节的诊断和治疗提供了新的途径^[6, 7], 但它在肺结节手术的术中麻醉管理和术后镇痛管理等方面的意义仍未明确。本文针对非气管插管胸腔镜在肺结节手术中的适应证、禁忌证、可行性及麻醉管理作一综述。

非气管插管胸腔镜在肺结节手术中的可行性

传统胸腔镜手术主要是在全麻下进行, 而非气管插管

胸腔镜手术则是在局麻下完成。经支气管导管进行的单肺通气是传统胸腔镜下肺结节切除术所必需的^[8], 而插管全麻和单肺通气后的不良反应不可忽视, 包括插管相关性气道创伤、神经肌肉麻痹、肺不张、呼吸机相关性肺损伤和术后恶心呕吐等^[7, 9]。对于解剖结构复杂的患者, 柔性支气管镜检查能更有助于麻醉医师将双腔气管内导管置入^[10, 11]。但是, 任何促进胸部手术中肺塌陷的方法均存在气道相关并发症风险, 包括咽喉痛、声音嘶哑、杓状软骨脱臼、破裂等^[9, 10]。同时还可能存在机械通气对呼吸功能的继发性影响。非气管插管可以避免插管全麻的潜在风险, 并能明显促进患者术后早期恢复日常活动和缩短住院时间^[9, 12]。

在非气管插管胸腔镜的肺结节手术中, 目前普遍使用的麻醉方法是行胸部硬膜外麻醉, 于 T₄₋₅ 椎间隙置入硬膜外导管, 其余按常规硬膜外麻醉的方法进行。多个非气管插管胸腔镜手术相关的可行性研究介绍了非气管插管胸腔镜在胸膜活检、楔形切除术、皮质剥脱术以及肺叶切除术等中的应用^[2, 4, 6, 7]。然而, 大多数研究均存在病例数少或非随机对照的情况, 并多在同一机构内进行。此外, 患者人群、镇静/镇痛技术及结果指标差异较大^[9, 13]。与传统胸腔镜手术比较, 非气管插管胸腔镜的医疗费用有所下降, 同时缩短了麻醉时间、手术时间及住院时间^[9], 患者对麻醉的

DOI:10.12089/jca.2018.02.025

作者单位: 528400 广州中医药大学附属中山中医院 中山市中医院麻醉科

通信作者: 吴论, Email: wulungg@163.com