

综述

触发肌电图监测技术及其在脊柱矫形内固定术中应用的研究进展

Research progress of application of triggered EMG monitoring in spine correction

杨军林, 邓耀龙, 黄紫房

(中山大学附属第一医院脊柱侧弯中心 510080 广州市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2013.08.16

中图分类号: R687.3, R741.044 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2013)-08-0752-04

目前, 椎弓根螺钉内固定技术已被广泛应用于各种脊柱手术中, 椎弓根置钉不良会导致神经损伤和内固定失败等^[1,2], 据报道, 因椎弓根螺钉置入不当引起的并发症发生率在 1%~11%^[3]。由 Calancie 等^[4,5]提出的触发肌电图(triggered electromyograph, t-EMG)监测技术被认为是可以评估椎弓根螺钉置入准确性客观、有效的方法。脊柱侧凸畸形常伴有椎弓根变异、椎体旋转、主动脉位置变异、凹侧椎弓根贴近脊髓等特点, 螺钉置入不当极易造成大动脉损伤、硬膜撕裂、神经根损伤, 甚至损伤脊髓等^[6-8], 对椎弓根螺钉置入准确性的要求更高, 此项技术在脊柱畸形矫正术中的应用意义更大。笔者就触发肌电图监测技术的原理、方法、临床应用及其研究进展综述如下。

1 基本原理

t-EMG 监测的原理是利用恒压电源或恒流电源刺激

置入椎弓根内的螺钉, 对应节段的神经在受到电刺激后, 其支配肌肉的所有纤维被同步激活, 产生复合肌肉动作电位(compound muscle action potentials, CMAPs)。当置入的椎弓根螺钉完全在骨性结构中, 需很强的电刺激才能引起肌肉收缩, 电刺激引起肌肉反应的阈值会升高; 反之, 当椎弓根螺钉突破椎体骨性结构, 直接或通过软组织接触到周围神经组织, 阈值会降低。

2 监测技术

2.1 刺激方法

临床上, t-EMG 监测技术常规用恒流电源刺激, 鳄鱼夹电极夹于椎弓根螺钉作为阴极, 针电极置于对应的椎旁肌肉作为阳极, 两极间的电流形成回路, 刺激脊髓、骨性结构、脊神经及周围组织。操作时, 一般采用频率 1Hz, 脉宽 0.1~0.5ms 的电流持续刺激, 刺激电量从 0mA 逐渐增大, 直到触发出 CMAPs 信号或最大刺激量为止。该刺激电流值被称为刺激阈值。

在早期, 有文献报道过用电压刺激的触发肌电图技

第一作者简介: 男(1964-), 主任医师, 教授, 研究方向: 脊柱畸形
电话: (020)87755766-8236 E-mail: yjunlin@126.com

- 31(13): 1410-1414.
27. Stucker R. Results of treatment of progressive scoliosis with SMA staples[J]. Orthopade, 2009, 38(2): 176-180.
28. Betz RR, Kim J, D'Andrea LP, et al. An innovative technique of vertebral body stapling for the treatment of patients with adolescent idiopathic scoliosis: a feasibility, safety, and utility study[J]. Spine, 2003, 28(20): S255-265.
29. Ohlin A, Montgomery A, Abul-Kasim K. Vertebral body stapling in the treatment of thoracic adolescent idiopathic scoliosis in immature patients[C]. Presented at the 5th International Congress on Early Onset Scoliosis and Growing Spine. Orlando, Florida: 2011.
30. Lavelle WF, Samdani AF, Cahill PJ, et al. Clinical outcomes of nitinol staples for preventing curve progression in idiopathic scoliosis[J]. J Pediatr Orthop, 2011, 31(1 Suppl): 107-113.
31. Betz RR, Ranade A, Samdani AF, et al. Vertebral body stapling: a fusionless treatment option for a growing child with moderate idiopathic scoliosis[J]. Spine, 2010, 35(2): 169-176.
32. Gupta P, Hassani S, Hammerberg K. Growing rods as a salvage procedure after convex staple epiphyseodesis to control curve progression in young patients[C]. Presented at the 2nd International Congress on Early Onset Scoliosis and Growing Spine. Montreal, Canada: 2009.
33. O'Leary PT, Sturm PF, Hammerberg KW, et al. Convex hemiepiphysodesis: the limits of vertebral stapling[J]. Spine, 2011, 36(19): 1579-1583.

(收稿日期: 2013-04-28 修回日期: 2013-06-15)

(本文编辑 卢庆霞)

术^[9],但因椎体及周边组织阻抗个体差异较大,刺激电压的阈值标准较难建立,因此目前统一使用电流刺激方法。

2.2 采集方法

依次刺激不同椎体节段的椎弓根螺钉,在对应节段的肌群采集 CMAPs,采集电极采用双极皮下针电极,置于对应神经支配肌肉的肌腹中,记录 t-EMG 阈值常用的肌群及其对应的神经支配节段^[10](表 1)。腰骶椎 t-EMG 的研究与临床应用较广,t-EMG 监测技术对腰骶椎椎弓根螺钉置入准确性的监测被证实相对可靠^[3-5,11],但胸椎 t-EMG 监测并没有建立很好的标准,记录肌群的选择及节段定位争议较多。Danesht-Clough 等^[12]在羊的实验研究上发现腹横肌、肋间肌、髂腰肌记录的 t-EMG 阈值可较好提示 T8~L2 椎弓根螺钉位置,Lewis 等^[13]在对猪的胸椎螺钉的研究上也发现,T6~T15 神经根直接支配的肋间肌可监测 T6~T15 螺钉置入的准确性。基于前两者的动物实验研究结果,Raynor 等^[14]提出用腹直肌作为 T6~T12 的 t-EMG 采集肌群,并建立了 T6~T12 的 t-EMG 阈值警戒标准,取得了较好的临床应用。后有 de Blas 等^[15]的动物实验研究提出了对侧肋间肌评估胸椎螺钉位置的监测意义,肋间肌的监测作用值得进一步研究。Shi 等^[16]在 2003 年报道了 T1~T12 胸椎螺钉 t-EMG 监测的临床应用,分别采用尺侧腕屈肌、肋间肌、腹肌记录节段 T1、T2~T6、T7~T12 的螺钉刺激阈值,研究发现螺钉刺激阈值>11mA 时,可获得 97.5% 的阴性预测值,提出了当刺激阈值>11mA 时椎弓根钉道基本保持完整,可提示椎弓根螺钉置入良好,初步建立了全胸椎螺钉监测的阈值标准。但考虑其样本量较小,其可靠性有待大样本的统计研究验证。对于上胸椎的监测,Rodriguez-Olaverri 等^[17]于 2008 年发表了临床上采用肋间肌记录 t-EMG 阈值评价上胸椎 T3~T6 椎弓根螺钉置入准

确性的报道,认为采用肋间肌采集 t-EMG 可以有效监测上胸椎 T3~T6 椎弓根螺钉的置入情况。Regidor 等^[18]有在腋窝处放置电极记录上胸椎 T2~T6 螺钉 t-EMG 阈值的应用报道,提出腋窝中线处记录的 t-EMG 阈值可有效监测 T2~T6 的椎弓根螺钉置入的安全性。从上胸椎的解剖关系看,因受多节段神经根交叉支配,上胸椎的监测非单一肌群可记录,故目前上胸椎的 t-EMG 阈值标准仍存在较大争议,临床上尚未普遍应用。对于颈椎椎弓根螺钉的 t-EMG 监测,尚未见报道。

2.3 麻醉要求

t-EMG 记录的是神经受刺激后复合肌肉动作电位反应,因此,要特别注意神经肌肉接头阻断剂(肌松药)和有神经肌肉接头阻滞作用的吸入性气体麻醉药物的使用情况^[3,14]。当实施 t-EMG 测试时,患者肌肉需完全松弛,否则记录不到任何肌肉动作电位;肌肉不完全松弛,会影响 t-EMG 阈值,故当行 t-EMG 测试时,应避免肌松药物的使用。如手术要求需用肌松药者,在 t-EMG 测试时需提前停止泵注肌松药,排除肌松影响,并可采用四联刺激肌肉收缩反应测试(train of four twitch test,TOF)行肌松状态的监测^[19]。1971 年 Ali 等^[20]证实 TOF 小于 0.6 将伴随有肌肉无力,一旦大于 0.7 时,就能够睁眼、抬头并具有适当的呼吸能力,从而确定了无残留肌松作用的标准必须是 TOF $\geq$ 0.7,这个标准被沿用了 20 多年。近年来的临床研究表明 TOF 为 0.7 时仍有残留肌松作用,存在许多潜在的危险因素,应将神经肌肉恢复标准定为 TOF $\geq$ 0.9^[21,22]为好。一般认为保持 4 个肌肉收缩反应^[3]或者 T4/T1 的波幅比值大于 0.9 时,肌松药基本完全代谢,可行 t-EMG 测试。对于其他麻醉药物的使用,无特殊要求,一般只需兼顾其他电生理监测即可。

2.4 警戒阈值标准

腰骶椎 t-EMG 的阈值标准在不断的实验研究及临床实践中得到建立^[3-5,11],见表 2。但胸椎 t-EMG 监测并没有建立很好的标准,争议较多。Raynor 等^[14]对 677 枚椎弓根螺钉进行统计分析,建立了下胸椎 T6~T12 监测的阈值标准,见表 3。而上胸椎及颈椎的 t-EMG 阈值标准仍有待研究。

3 临床应用与研究进展

1992 年,Calancie 等^[4]首次报道了应用电刺激椎弓根螺钉诱发肌肉电位,以监测椎弓根螺钉置入准确性的动物实验,证实 t-EMG 监测方法可以监测椎弓根螺钉置入的准确性。1994 年,Calancie 等^[5]又报道了 t-EMG 监测技术的临床实践,结果显示 t-EMG 能有效地监测出临床中置入不当的椎弓根螺钉。随后有针对不同人群的临床应用报道^[23,24],也证明了使用 t-EMG 监测技术对椎弓根螺钉置入准确性的评价是有效的。自 Calancie 等^[4,5]的动物实验及临床研究全面系统地报道了金属椎弓根螺钉置入对周围神经结构影响的电生理技术,这项技术在临床中的应用越发

表 1 记录 t-EMG 阈值使用的肌肉及其对应的椎体节段

记录肌群	椎体节段
腹直肌	T6~T12
内收肌	L1~L2
股四头肌	L3~L4
胫前肌	L5
腓肠肌	S1~S2

表 2 腰骶椎螺钉阈值标准

椎弓根螺钉位置	报警阈值
全部在骨道内	>8.0mA
可能破壁	4.0~8.0mA
极可能破壁	<4.0mA

表 3 下胸椎(T6~T12)螺钉阈值标准

椎弓根螺钉位置	报警阈值
全部在骨道内	>6.0mA
可能破壁	<6.0mA 且低于阈值平均值的 40%

广泛,尤其在脊柱侧凸矫正术中。

Lenke 等^[1]报道了对 54 例患者 233 枚椎弓根螺钉在 L2~S1 腰骶椎体节段实施 t-EMG 监测的临床应用。结果显示置入不当的螺钉可以被检出,并对监测的螺钉阈值建立了三组细化标准:螺钉正常置入组的刺激阈值大于 8mA;螺钉部分偏出组的刺激阈值在 4.0~8.0mA;螺钉完全偏出组的刺激阈值小于 4mA。这给此后 t-EMG 监测技术的应用建定了标准。另外, Raynor 等^[4]对 4857 枚腰椎椎弓根螺钉的统计研究中发现,电流刺激阈值与置入不当的椎弓根螺钉具有相关性^[3]:当报警阈值为 8.0mA 时, t-EMG 监测的特异度为 94%, 敏感度为 86%;当报警阈值为 4.0mA 时,特异度为 99%,敏感度为 36%;当报警阈值为 2.8mA 时,特异度达到 100%,但敏感度则降至 8.4%。

Raynor 等^[4]发表了 t-EMG 监测对胸椎螺钉置入安全性评估的报道,他们在对 677 枚 T6~T12 椎弓根螺钉研究分析后,认为胸椎螺钉阈值若小于 6.0mA 且低于胸椎阈值平均值的 35%~40%,应怀疑置入椎弓根螺钉侵犯内壁,从而获得更为精确的胸椎螺钉阈值。Duffy 等^[25]报道了对 329 枚螺钉的 t-EMG 阈值与术后 CT 扫描结果比较的统计学分析研究,他们认为在胸椎及腰椎螺钉监测中,将阈值 6.0mA 定义为阈值警戒界线的更为合理,同时他们指出对于偏出侵犯椎弓根壁小于 2mm 的螺钉应该视为正常置入的螺钉。

Anderson 等^[26]对椎弓根螺钉进行了阻抗测试,结果显示某些万向螺钉钉体和万向头连接处的导电率为零,刺激电流不能正常传导至螺钉上,他认为这可能是 t-EMG 监测不准确的一个原因。同时,他建议进行 t-EMG 测试时负极刺激极不要使用鳄鱼夹电极,而用探针电极直接接触螺钉钉体进行刺激。根据我们的临床应用,作者认为采用鳄鱼夹电极刺激万向螺钉,是临床中出现的某些螺钉增加刺激电流至最大限制电流值仍不能触发肌肉动作电位的原因之一。

Montes 等^[27]在对 5 头猪 18 枚胸椎(T7~T11)椎弓根螺钉的实验研究中提出,胸椎螺钉刺激阈值与螺钉至脊髓间的距离有关,与椎弓根骨性完整性无关。后 Blas 等^[28]报道了对 23 例脊柱侧凸患者共 238 枚胸椎螺钉的统计分析研究,结果显示 t-EMG 监测能有效监测胸椎椎弓根螺钉,但对椎弓根内壁侵犯与螺钉进入椎管没有良好的区分,敏感度不高,他们认为椎弓根螺钉与脊髓的距离对电传导有着重要的作用,螺钉的刺激阈值与螺钉至脊髓间距离有关。另外,在正常置入椎弓根内的胸椎螺钉中,顶椎凹侧螺钉的阈值平均值较凸侧的低,认为需要根据侧凸畸形的凹凸侧划分刺激阈值标准。这临床研究进一步验证了 Montes 等的实验结果,为当前争议极大的胸椎螺钉,特别是脊柱侧凸畸形中的胸椎螺钉刺激阈值标准的建立奠定基础。

综合当前研究表明,触发肌电图监测技术作为一种临床上评估脊柱畸形矫正术中椎弓根螺钉置入准确性的方法是可行并且可靠的,但这项技术仍存在着缺陷和不

足,并不能完全准确地评价椎弓根的完整性。在临床应用中, t-EMG 监测需结合术中透视、探针探查等方法,更准确地评估椎弓根螺钉的安全性。目前,建立的阈值标准对监测腰骶椎椎弓根螺钉置钉精确性中的应用已得到广泛的肯定,且应用已十分成熟。但在胸椎特别是上胸椎(T1~T5)椎弓根螺钉置钉精确性中的应用则较为困难,主要是神经支配的不确定性,并没有建立很好的标准,从而严重影响了其临床应用价值。大量的工作旨在提高 t-EMG 监测在胸椎螺钉上的准确性。Miriam 等^[29]尝试通过高频群刺激来实现对胸椎螺钉更为可靠的监测,得到了一些初步的成果。但是这些针对刺激方法的研究没有显著地提高胸椎 t-EMG 监测的准确性,这可能是由于刺激方式并不是影响胸椎螺钉监测准确性的主要因素,要改善胸椎 t-EMG 监测效果,需要进一步改进采集方法和监测技术。对于脊柱侧凸畸形中胸椎螺钉根据畸形凹凸侧划分的阈值标准,仍需进一步研究确定。有关 t-EMG 监测技术存在的争论问题仍待商榷与研究。

4 参考文献

1. Brown CA, Lenke LG, Bridwell KH, et al. Complications of pediatric thoracolumbar and lumbar pedicle screws[J]. Spine, 1998, 23(14): 1566-1571.
2. Gelalis ID, Paschos NK, Pakos EE, et al. Accuracy of pedicle screw placement: a systematic review of prospective in vivo studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation techniques[J]. Eur Spine J, 2012, 21(2): 247-255.
3. Raynor BL, Lenke LG, Bridwell KH, et al. Correlation between low triggered electromyographic thresholds and lumbar pedicle screw malposition: analysis of 4857 screws[J]. Spine, 2007, 32(24): 2673-2678.
4. Calancie B, Lebowitz N, Madsen P, et al. Intraoperative evoked EMG monitoring in an animal model: a new technique for evaluating pedicle screw placement[J]. Spine, 1992, 17(10): 1229-1235.
5. Calancie B, Madsen P, Lebowitz N. Stimulus-evoked EMG monitoring during transpedicular lumbosacral spine instrumentation. Initial clinical results[J]. Spine, 1994, 19(24): 2780-2786.
6. Lopera JE, Restrepo CS, Gonzales A, et al. Aortoiliac vascular injuries after misplacement of fixation screws[J]. J Trauma, 2010, 69(4): 870-875.
7. Liu J, Shen J, Zhang J, et al. The Position of the Aorta Relative to the Spine for Pedicle Screw Placement in the Correction of Idiopathic Scoliosis[J]. J Spinal Disord Tech, 2012, 25(4): E103-107.
8. Gautschi OP, Schatlo B, Schaller K, et al. Clinically relevant complications related to pedicle screw placement in thoracolumbar surgery and their management: a literature review of 35,630 pedicle screws[J]. Neurosurg Focus, 2011, 31(4): E8.
9. Young WF, Morledge DE, et al. Intraoperative stimulation of

- pedicle screws: A new method for verification of screw placement[J]. Surgical Neurology, 1995, 44(6): 544-547.
10. Gray H. Anatomy, Descriptive and Surgical [M]. Philadelphia, PA: Running Press, 1974. 779.
 11. Lenke LG, Padberg AM, Russo MH, et al. Triggered electromyographic threshold for accuracy of pedicle screw placement. An animal model and clinical correlation [J]. Spine, 1995, 20(14): 1585-1591.
 12. Danesh-Clough T, Taylor P, Hodgson B, et al. The use of EMG in detecting misplaced thoracolumbar pedicle screws[J]. Spine, 2001, 26(12): 1313-1316.
 13. Lewis SJ, Raynor BL, Lenke LG, et al. Triggered electromyographic threshold for accuracy of thoracic pedicle screw placement in a porcine model[J]. Spine, 2001, 26(22): 2485-2489.
 14. Raynor BL, Lenke LG, Kim Y, et al. Can triggered electromyograph thresholds predict safe thoracic pedicle screw placement[J]? Spine, 2002, 27(18): 2030-2035.
 15. de Blas G, Burgos J, Regidor I, et al. Recording diffusion responses from contralateral intercostal muscles after stimulus-triggered electromyography: refining a tool for the assessment of thoracic pedicle screw placement in an experimental porcine model[J]. Spine, 2009, 34(11): E391-396.
 16. Shi YB, Binette M, Martin WH, et al. Electrical stimulation for intraoperative evaluation of thoracic pedicle screw placement[J]. Spine, 2003, 28(6): 595-601.
 17. Rodriguez-Olaverri JC, Zimick NC, Merola A, et al. Using triggered electromyographic threshold in the intercostal muscles to evaluate the accuracy of upper thoracic pedicle screw placement(T3-T6)[J]. Spine, 2008, 33(7): E194-197.
 18. Regidor I, de Blas G, Barrios C, et al. Recording triggered EMG thresholds from axillary chest wall electrodes: a new refined technique for accurate upper thoracic(T2-T6) pedicle screw placement[J]. Eur Spine J, 2011, 20(10): 1620-1625.
 19. Helbo-Hansen HS, Bang U, Nielsen HK, et al. The accuracy of train-of-four monitoring at varying stimulating currents [J]. Anesthesiology, 1992, 76(2): 199-203.
 20. Ali HH, Utting JE, Gray TC. Quantitative assessment of residual antidepolarizing block (part 1)[J]. Br J Anaesth, 1971, 43(5): 473-477.
 21. Kopman AF, Yee PS, Neuman GG. Relationship of the train-of-four fade ratio to clinical signs and symptoms of residual paralysis in awake volunteers [J]. Anesthesiology, 1997, 86(4):765-771.
 22. 郑晖, 苏跃, 李明远, 等. 围术期 TOF 监测与残余肌松——潘库溴铵与维库溴铵的比较[J]. 中华麻醉学, 2001, 21(5): 261-264.
 23. Capron F, Alla F, Hottier C, et al. Can acceleromyography detect low levels of residual paralysis? A probability approach to detect a mechanomyographic train-of-four ratio of 0.9[J]. Anesthesiology, 2004, 100(5): 1119-1124.
 24. Maybauer DM, Geldner G, Blobner M, et al. Incidence and duration of residual paralysis at the end of surgery after multiple administrations of cisatracurium and rocuronium [J]. Anaesthesia, 2007, 62(1): 12-17.
 25. Duffly MF, Phillips JH, Knapp DR, et al. Usefulness of electromyography compared to computed tomography scans in pedicle screw placement[J]. Spine, 2010, 35(2): E43-E48.
 26. Anderson DG, Lawrence RW, Daniel MS, et al. Pedicle screws with high electrical resistance. A potential source of error with stimulus-evoked EMG[J]. Spine, 2002, 27(14): 1577-1581.
 27. Montes E, De Blas G, Regidor I, et al. Electromyographic thresholds after thoracic screw stimulation depend on the distance of the screw from the spinal cord and not on pedicle cortex integrity[J]. Spine J, 2012, 22(2): 127-132.
 28. de Blas G, Barrios C, Regidor I, et al. Safe pedicle screw placement in thoracic scoliotic curves using t-EMG: stimulation threshold variability at concavity and convexity in apex segments[J]. Spine, 2012, 37(6): E387-395.
 29. Donohue ML, Murtagh-Schaffer C, Basta J, et al. Pulse-train stimulation for detecting medial malpositioning of thoracic pedicle screws[J]. Spine, 2008, 33(12): E378-E385.

(收稿日期:2012-09-19 修回日期:2012-12-03)

(本文编辑 彭向峰)

消息

第二届椎间盘疾患微创技术讲习班暨中日脊柱前沿技术学术交流会通知

由清华大学附属北京市垂杨柳医院、中日科技交流协会联合主办“第二届椎间盘疾患微创技术讲习班暨中日脊柱前沿技术学术交流会”(国家级继续医学教育项目 I 类学分),定于 2013 年 11 月 8 日在北京举办。主要内容包括:显微镜下经后方肌间隙入路颈椎管扩大成形术在颈椎病、颈脊髓肿瘤中的临床应用、cortical bone trajectory(CBT) screw 在 PLIF 中的应用、脊柱内镜下椎间融合技术研究、间盘介入微创技术治疗椎间盘源性腰痛、颈腰椎病的新进展。

报名:请于 2013 年 11 月 1 日前信函或电话回执,以便安排食宿。

联系地址:北京市朝阳区垂杨柳南街 2 号 清华大学附属北京市垂杨柳医院骨科 100022; 联系人:张彤童 (13810936372)、孙敬 (18210833835)、韩正锋 (13466356425) 或 67718822 转 2097/2105; E-MAIL: zhangtong6789@163.com, rlxpldd@sina.com; 查询网址: http://www.rlxpldd.com。