

· 综述 ·

电阻抗断层成像在围术期机械通气管理中的应用进展

曹爽 夏明 姜虹

20 世纪 80 年代发明的电阻抗断层成像 (electrical impedance tomography, EIT) 技术是一种基于人体组织不同导电能力的无创、无辐射成像技术^[1]。目前 EIT 在胃排空、神经功能监测、乳腺显像及肺功能评估中,均显示出广泛的应用前景^[2]。其中,肺功能成像是 EIT 目前最主要的应用领域。不同于传统影像成像技术和常规肺功能监测,EIT 具有床旁实时动态评估区域通气功能的优势。越来越多的研究报告 EIT 技术在围术期应用的可行性,在术前肺功能评估、术中个体化的机械通气管理,以及术后肺部并发症的防治等方面具有重要指导意义^[3]。本文就 EIT 在围术期机械通气管理中的应用作一综述。

EIT 概述

原理 EIT 是利用生物组织的电特性,通过配置于生物体表面的电极阵列,施加安全的激励电流,测量相邻电极对之间的电压差,运用重建算法将所有电压文件重叠并消除伪像,再用高斯滤波器对图像进行处理,最终得到一幅动态横截面图像^[4]。肺内气体体积增加会降低传导性,整个吸气过程可将局部生物阻抗放大约 300%。故 EIT 可通过监测生理及病理状态下肺通过程中的电阻抗变化,实现肺功能成像^[5]。

测量指标 (1)空间分布参数。①潮气阻抗变化 (tidal impedance variation, TIV):区域 TIV 可反映所选目标区域 (region of interests, ROIs) 通气特征^[4]。②呼气末肺阻抗 (end-expiratory lung impedance, EELI):与呼气末肺容积 (end-expiratory lung volume, EELV) 线性相关^[6]。③阻抗比 (impedance ratio, IR):可反映肺复张和去复张^[4]。④通气中心 (center of ventilation, COV):COV 越高表示通气向背侧移动^[7]。⑤整体不均匀性 (global inhomogeneity GI) 指数:GI 越大提示肺内气体分布越不均匀^[4]。⑥区域呼吸系统顺应性 (regional respiratory system compliance, Crs):定位和量化区域肺泡塌陷和过度膨胀^[4]。⑦静默空间 (silent spaces):依赖静止区 (dependent silent spaces, DSS) 提示肺不张,非依赖静止区 (non-dependent silent spaces, NSS) 提示过度通气^[8]。

(2)时间分布参数。①区域通气延迟异质性 (regional

ventilation delay inhomogeneity, RVDI):可量化区域通气的时间异质性^[9]。②局部呼气时间常数 (τ):可量化呼气过程中的区域异质性^[10]。

操作方法 将集成 16 个电极的电极缚带环绕胸壁第 4~5 肋间放置,参考电极置于腹部^[1]。

适应证 监测机械通气;判断肺通气分布均一性,过度膨胀/塌陷评估,顺应性测定,PEEP 滴定,肺可复张性评估等;评估通气功能:慢性阻塞性肺疾病 (COPD)、哮喘的肺功能辅助评估,支气管痉挛、气胸的通气功能检测等^[1]。

禁忌证 植入心脏起搏器、心律除颤器者;检测部位存在皮肤受损、炎症或骨折等损伤者;使用无创心排量监测仪、外科电刀或强磁场环境^[1]。

影响因素 大面积肺水肿、组织水肿、肥胖患者会导致信号质量下降;电极缚带放置在创伤敷料上会导致电极接触不良;电极移动可导致基线位移,引发伪像^[1]。

局限性 EIT 空间分辨率较低,不能提供精确解剖学定位,属于功能成像,明确诊断常需结合其他辅助检查^[1]。

EIT 在术前评估中的应用

EIT 可能成为术前肺功能评估的新工具,不仅是全局,还可在区域水平上评估疾病严重程度和治疗效果。EIT 在支气管舒张试验中显示出高度敏感性,通过监测试验前后通气均一性变化,评估支气管扩张剂的局部效应,为哮喘患者围术期用药提供参考^[11]。EIT 可监测围术期 COPD 的患者在肺功能检查中随时间变化的肺通气分布,识别存在气流限制与肺过度膨胀的高危患者,据此可调整术中机械通气参数设置 (通常需要更长的呼气时间) 及给予更积极的雾化治疗^[12]。

EIT 在麻醉诱导期的应用

麻醉诱导期间功能残气量 (functional residual capacity, FRC) 降低,若 FRC 低于闭合容积会导致通气/血流比例失调及 $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ 下降;若 FRC 高于生理值,则增加跨肺压。预氧合是麻醉诱导过程的重要组成部分,旨在增加 FRC,增加肺内氧储备,增加建立人工气道的时间。Humphreys 等^[13]报道,择期行心脏手术的患儿中,EIT 监测下可及时发现麻醉诱导后 FRC 的降低,并通过应用 PEEP 逆转这种改变。在病态肥胖患者中,如使用紧扣面罩和 10 cmH₂O PEEP 进行预氧合,可短暂增加 FRC,有助于避免低氧血症,而不施加 PEEP 的面罩通气,FRC 则会显著降低^[9,14]。这些研究提示,可以利用 EIT 动态监测麻醉诱导阶段通气变化,评估不

DOI:10.12089/jca.2021.02.022

基金项目:上海市科学技术委员会项目 (18441904600)

作者单位:200011 上海交通大学医学院附属第九人民医院麻醉科

通信作者:姜虹,Email: dr_hongjiang@163.com

同预氧合策略的效果。

此外,在双腔管(double-lumen tubes, DLTs)气管插管过程中,常规使用纤维支气管镜定位。Steinmann 等^[15]研究表明,EIT 可以准确显示左、右肺通气分布,从而无创识别出 DLTs 在对侧主支气管的错误放置,提示 EIT 可在气管导管位置及深度判断方面发挥一定作用。

EIT 在术中通气管理中的应用

PEEP 滴定 术中 PEEP 的正确设置对于预防肺不张的发生具有重要作用。PEEP 不足不能维持肺泡开放,而 PEEP 过高可能导致肺损伤。EIT 可精确测量全局及区域性肺通气分布,基于 EIT 的个体化 PEEP 设置已成为目前研究的热点。在腹部手术麻醉期间,接受保护性潮气量通气的同时,使用 EIT 指导 PEEP 滴定,将肺过度膨胀和塌陷的曲线交叉点上方最近的 PEEP 定为最佳 PEEP,可降低术后肺不张发生率和减轻严重程度,降低驱动压力,改善呼吸顺应性及氧合^[16]。Nestler 等^[9]研究表明,使用 EIT 技术计算 RVDI,将最低 RVDI 匹配的 PEEP 定为最佳 PEEP,与固定 PEEP (5 cmH₂O)组比较,可改善全身麻醉下行腹腔镜手术病态肥胖患者的氧合、EELV 和通气分布,但这些效果仅能维持到术后早期,故建议肺保护策略应该延续到术后。Erlandsson 等^[14]研究表明,通过 EIT 追踪 EELI 斜率的变化来优化 PEEP 设置,可预防病态肥胖患者肺塌陷和改善气体交换。

机械通气模式选择 腹腔镜手术应用广泛,但是 CO₂ 气腹和头低足高的特殊体位(Trendelenburg 体位)会对患者的呼吸、循环系统产生不利影响。王冰洁等^[8]采用 EIT 技术观察容量控制通气(volume control ventilation, VCV)和压力控制容量保证通气(pressure control ventilation-volume guaranteed, PCV-VG)模式对腹腔镜下 Trendelenburg 体位患者全麻术中肺通气的影响,结果表明与 VCV 组比较,PCV-VG 组 COV 升高,DSS 面积百分比降低,PCV-VG 通气模式显著改善患者术中肺通气及肺氧合功能。这提示基于 EIT 对通气功能的监测,可为术中机械通气模式的选择提供参考。

评估全麻药物对通气功能的影响 全身麻醉时使用顺式阿曲库铵具有降低气管插管反应和肌肉张力的优势,但对通气功能的影响尚不清楚。张君宝等^[17]采用 EIT 监测 COV 及 DSS、NSS 面积百分比,评价顺式阿曲库铵在老年患者膝关节置换术中对肺通气功能的影响,结果表明顺式阿曲库铵可显著改善术中通气情况,降低气道压力,且对术后肺功能、拔管时间及氧合情况无明显影响。EIT 在评估全身麻醉药物对通气功能的影响方面具有一定优势。

保留自主呼吸全身麻醉的通气功能监测 保留自主呼吸的全身麻醉在短小手术中十分常用,但由于镇静镇痛药物的呼吸抑制作用会导致低氧血症。Bordes 等^[18]观察无痛消化内镜手术中,应用 EIT 评估无创通气(noninvasive ventilation, NIV)对 FRC 和通气分布的影响,结果表明麻醉诱导后,EELI 显著下降,非重力依赖区的通气分布增加,应

用 NIV 虽不能影响通气分布,但可明显增加 EELI,这提示在保留自主呼吸的全身麻醉时,应用 NIV 对通气功能有积极影响,但该研究未监测动脉血氧饱和度,NIV 是否可降低氧血症的发生率尚需进一步明确。

EIT 在术后通气管理中的应用

鉴别术后肺不张 麻醉药物残留、吸气力量减弱、跨肺压降低、咳嗽反射受抑、残余肌松和/或镇痛不足导致分泌物清除能力下降等因素,均显著增加术后肺不张风险。李锐等^[19]通过 EIT(COV 及 DSS、NSS 面积百分比)评价肺复张手法(recruitment maneuver, RM)对腹腔镜胆囊切除术后早期肺通气的影响,结果表明 RM 可改善术后早期局部肺通气下降,但对肺不张和低通气并无改善。Karsten 等^[20]应用 EIT 监测腹/背和右/左肺 IR 和 COV,评价腹腔镜手术中 PEEP 对术后通气分布的影响,结果表明术中高 PEEP 会使术后早期通气分布更均匀。Yuan 等^[21]使用 EIT 评估高流量鼻导管(high-flow nasal cannula, HFNC)对腹部手术拔管后患者局部肺功能的影响,结果表明,与常规氧疗法比较,HFNC 显著改善腹侧和背侧肺区的 EELI,且舒适度更高。上述研究提示,EIT 可有助于完善术后肺不张严重程度及治疗效果评估。

识别支气管痉挛和气胸 支气管痉挛是拔管早期并发症,在哮喘、COPD、气道高反应及患儿中常见。有研究^[10]应用 EIT 监测患儿肝移植术后 τ 的变化,发现支气管痉挛时 τ 显著增加,吸入沙丁胺醇后 τ 迅速降低。Morais 等^[22]报道了在对 1 例 ARDS 患者进行 RM 时(PEEP 25 cmH₂O,平台压为 40 cmH₂O),EIT 检测到左腹象限图像亮度突然增加,提示该区域通气量增加与 PEEP 增加不成比例,随后肺部超声“肺点”确认了气胸的诊断。这些研究提示 EIT 具有快速床旁识别支气管痉挛、气胸等不良事件的潜力,其在提高术后气道管理安全性方面的作用尚需进一步明确。

预估脱机 临床上通常用自主呼吸试验(spontaneous breathing trial, SBT)预估脱机成功率,但通过 SBT 的患者中,仍有多达 40%脱机失败。Zhao 等^[23]应用 EIT 实时监测 SBT 期间的潮气量变化及局部通气分布,结果表明,当压力支持水平降低时,如果通气分布更均匀,意味着脱机成功率更高。这提示 EIT 在预测脱机结局、降低拔管失败率方面具有一定优势,但仍需要前瞻性随机对照试验来进一步证实。

吸痰 术后留置气管导管常规需要气管内吸引清除气道分泌物,而气管内吸引可致肺去复张。Corley 等^[24]通过应用 EIT 技术比较开放式吸痰(open suction, OS)与封闭式吸痰(closed suction, CS)对肺容量的影响,结果表明,CS 能显著降低肺容量的损失,但 EELV 恢复却显著减慢,故不能认为 CS 可保护吸引后的肺容量,建议不管采用何种方法,均应考虑 RM 来恢复 EELV。Heinze 等^[25]通过 EIT 计算 IR 来评估肺腹背部潮气量的分布,评估心脏术后患者气管内吸引后进行 RM 的效果,FRC 减少者从 RM 中获益更多,提示 EIT 可指导对气管内吸引后肺复张策略的选择。

小 结

与 CT、MRI、超声等传统影像学技术及常规肺功能监测不同, EIT 利用生物阻抗携带的丰富生理和病理信息, 可实现床旁、无创、连续、动态的功能性成像。围术期应用 EIT 技术有助于完善术前肺功能评估, 实现术中通气功能的实时监测, 优化通气参数设置, 识别术后肺部并发症, 还可为拔管和脱机管理提供依据, 在围术期通气管理中颇具应用前景。对于 EIT 技术在不同应用领域监测参数制定、治疗目标的规范化设置, 以及适应人群的选择方面仍需要进一步研究探索。同时, 更易于使用的在线分析程序也亟待开发, 以简化 EIT 图像转化为临床参数的过程, 使 EIT 技术更好地满足临床实践需求。

参 考 文 献

- [1] Frerichs I, Amato MB, van Kaam AH, et al. Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the translational EIT development study group. *Thorax*, 2017, 72(1): 83-93.
- [2] Bayford R, Halter RJ. Focus on advances in electrical impedance tomography. *Physiol Meas*, 2018, 39(9): 090301.
- [3] Spinelli E, Mauri T, Fogagnolo A, et al. Correction to: Electrical impedance tomography in perioperative medicine: careful respiratory monitoring for tailored interventions. *BMC Anesthesiol*, 2019, 19(1): 172.
- [4] Putensen C, Hentze B, Muenster S, et al. Electrical impedance tomography for cardio-pulmonary monitoring. *J Clin Med*, 2019, 8(8): 1176.
- [5] de Castro Martins T, Sato AK, de Moura FS, et al. A review of electrical impedance tomography in lung applications: theory and algorithms for absolute images. *Annu Rev Control*, 2019, 48: 442-471.
- [6] Eronia N, Mauri T, Maffezzini E, et al. Bedside selection of positive end-expiratory pressure by electrical impedance tomography in hypoxemic patients: a feasibility study. *Ann Intensive Care*, 2017, 7(1): 76.
- [7] Frerichs I, Zhao Z, Becher T. Simple electrical impedance tomography measures for the assessment of ventilation distribution. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 201(3): 386-388.
- [8] 王冰洁, 李云, 王家友, 等. 不同通气模式对腹腔镜下 Trendelenburg 体位患者肺通气的影响. *临床麻醉学杂志*, 2020, 36(9): 852-856.
- [9] Nestler C, Simon P, Petroff D, et al. Individualized positive end-expiratory pressure in obese patients during general anaesthesia: a randomized controlled clinical trial using electrical impedance tomography. *Br J Anaesth*, 2017, 119(6): 1194-1205.
- [10] de la Oliva P, Waldmann AD, Böhm SH, et al. Bedside breathwise visualization of bronchospasm by electrical impedance tomography could improve perioperative patient safety: a case report. *A A Case Rep*, 2017, 8(12): 316-319.
- [11] Frerichs I, Zhao Z, Becher T, et al. Regional lung function determined by electrical impedance tomography during bronchodilator reversibility testing in patients with asthma. *Physiol Meas*, 2016, 37(6): 698-712.
- [12] Vogt B, Zhao Z, Zabel P, et al. Regional lung response to bronchodilator reversibility testing determined by electrical impedance tomography in chronic obstructive pulmonary disease. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*, 2016, 311(1): L8-L19.
- [13] Humphreys S, Pham TM, Stocker C, et al. The effect of induction of anesthesia and intubation on end-expiratory lung level and regional ventilation distribution in cardiac children. *Paediatr Anaesth*, 2011, 21(8): 887-893.
- [14] Erlandsson K, Odenstedt H, Lundin S, et al. Positive end-expiratory pressure optimization using electric impedance tomography in morbidly obese patients during laparoscopic gastric bypass surgery. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2006, 50(7): 833-839.
- [15] Steinmann D, Stahl CA, Minner J, et al. Electrical impedance tomography to confirm correct placement of double-lumen tube: a feasibility study. *Br J Anaesth*, 2008, 101(3): 411-418.
- [16] Pereira SM, Tucci MR, Morais C, et al. Individual positive end-expiratory pressure settings optimize intraoperative mechanical ventilation and reduce postoperative atelectasis. *Anesthesiology*, 2018, 129(6): 1070-1081.
- [17] 张君宝, 吴云, 张杨, 等. 电阻抗成像法评价顺式阿曲库铵对老年膝关节置换术患者肺通气功能的影响. *临床麻醉学杂志*, 2020, 36(7): 651-655.
- [18] Bordes J, Goutorbe P, Cungi PJ, et al. Noninvasive ventilation during spontaneous breathing anesthesia: an observational study using electrical impedance tomography. *J Clin Anesth*, 2016, 34: 420-426.
- [19] 李锐, 孙玉红, 李云, 等. 肺复张对腹腔镜胆囊切除术后早期肺通气的影响: 电阻抗成像法评价. *中华麻醉学杂志*, 2018, 38(3): 271-273.
- [20] Karsten J, Heinze H, Meier T. Impact of PEEP during laparoscopic surgery on early postoperative ventilation distribution visualized by electrical impedance tomography. *Minerva Anesthesiol*, 2014, 80(2): 158-166.
- [21] Yuan Z, Han X, Wang L, et al. Oxygen therapy delivery and body position effects measured with electrical impedance tomography. *Respir Care*, 2020, 65(3): 281-287.
- [22] Morais CC, De Santis Santiago RR, Filho JR, et al. Monitoring of pneumothorax appearance with electrical impedance tomography during recruitment maneuvers. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 195(8): 1070-1073.
- [23] Zhao Z, Peng SY, Chang MY, et al. Spontaneous breathing trials after prolonged mechanical ventilation monitored by electrical impedance tomography: an observational study. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2017, 61(9): 1166-1175.
- [24] Corley A, Spooner AJ, Barnett AG, et al. End-expiratory lung volume recovers more slowly after closed endotracheal suctioning than after open suctioning: a randomized crossover study. *J Crit Care*, 2012, 27(6): 742.e1-e7.
- [25] Heinze H, Eichler W, Karsten J, et al. Functional residual capacity-guided alveolar recruitment strategy after endotracheal suctioning in cardiac surgery patients. *Crit Care Med*, 2011, 39(5): 1042-1049.

(收稿日期: 2020-06-06)