

· 综述 ·

电阻抗断层成像技术指导个体化呼气末正压通气的研究进展

徐佳世 罗艳

呼气末正压通气 (positive end expiratory pressure, PEEP) 是常用的机械通气参数之一。联合 PEEP 通气可以使塌陷的肺泡及支气管扩张,改善肺通气和弥散功能,但过高的 PEEP 可能导致肺损害及血流动力学改变。目前关于 PEEP 的设置仍存在争论。电阻抗断层成像技术 (electrical impedance tomography, EIT) 将肺通气过程中阻抗变化以图像呈现,能够反映 PEEP 调整前后的肺部运动及通气变化^[1]。本文就 EIT 指导个体化 PEEP 设置作一综述。

EIT 与 PEEP 概述

EIT 能够通过物体表面的电流感知内部电阻变化,近年来多应用于医学领域尤其是呼吸力学方面的研究。EIT 能够可靠反映患者肺通气分布情况。Tomicic 等^[2]研究表明,EIT 图像量化数值与 CT 图像高度吻合。EIT 还具有体积小、即时、无创、无辐射等特点,在改变呼吸参数后能够立即反映肺通气变化,使得 EIT 有潜力应用于床旁指导呼吸参数设置。

PEEP 是在机械通气呼气末保持一定气道压力,能够维持功能残气量稳定^[3],预防气道塌陷,改善患者氧合,减少术后肺不张和肺部感染等并发症的风险^[4]。但是过高的 PEEP 可能导致肺泡过度扩张、吸气压增高、胸腔压力增高、肺顺应性降低和肺功能损害,也对血流动力学造成不利影响^[5]。一项随机对照试验^[6]表明,根据肺顺应性设置 PEEP 相比低 PEEP 会增加术后 28 d 全因死亡率、延长拔管时间和增加气胸风险,证实不恰当的 PEEP 设置会对患者造成危害。目前临床指导 PEEP 设置的指标如二氧化碳水平、血氧饱和度和呼吸顺应性监测等,并不能反映肺区域通气情况,难以为不同患者确定最适 PEEP,成为临床工作中急需解决的问题。而 EIT 的出现为机械通气个体化 PEEP 设置提供了新的思路。

近几年国内外已有一些学者尝试探究 EIT 与 PEEP 应用的关系,希望能通过 EIT 确定不同患者适宜的 PEEP。王芹等^[7]使用 EIT 监测全麻手术患者肺通气情况,结果显示,随 PEEP 增加,肺过度通气区域得到改善,肺不张的区域也逐渐恢复通气,研究者根据 EIT 图像变化确定了最适宜的 PEEP。Zhao 等^[8]使用 EIT 为 24 例 ARDS 患者优化 PEEP 设置,证实 EIT 个体化 PEEP 设置是安全的,能够改善患者

氧合、提高肺顺应性和缩短拔管时间等。在这些研究中,对最适宜 PEEP 的定义不同,使用相关 EIT 参数也存在差异。

EIT 指导个体化 PEEP 的参数和应用

在 EIT 研究中最常见的方法是 PEEP 试验 (或 PEEP 滴定),即在递增或递减 PEEP 的过程中结合 EIT 监测参数确定最佳 PEEP,也据此衍生出许多 EIT 参数和术语。

像素顺应性 像素顺应性是较早出现的 EIT 参数之一,将潮气量除以 EIT 不同区域像素数量来估计各个区域肺顺应性。随着 PEEP 增加,像素顺应性也会增加,可以根据不同区域像素顺应性选择最佳 PEEP。Franchineau 等^[9]在此基础上,通过加权公式计算出 EIT 各个区域肺泡塌陷 (CL) 和过度通气 (OD) 情况。他们认为,最佳的 PEEP 为各个区域肺泡塌陷小于 15%,同时过度通气范围最小的状态。他们用该方法对 15 例使用 ECMO 的患者进行 PEEP 试验,结果表明,在最佳 PEEP 下患者潮气量和肺顺应性均有提高。Pereira 等^[10]认为 CL 和 OD 曲线交叉点意味着过度通气与肺泡塌陷达到平衡,此时为最佳 PEEP 值。研究者对 40 例行全麻手术患者进行随机对照研究,结果显示,根据 EIT 设置 PEEP 水平的试验组氧合指数更高,且结合 CT 提示该组术后肺不张较少。像素顺应性相关公式可以计算出精确数值,且与肺通气变化情况有良好的相关性,在近几年的 EIT 研究中得到了广泛应用。

呼气末肺阻抗梯度 呼气末肺阻抗 (end-expiratory lung impedance, EELI) 梯度是 EIT 设备根据患者肺阻抗变化制作的连续线性图像,Eronia 等^[11]认为恒定的 EELI 相当于稳定的呼气末肺容积 (end-expiratory lung volume, EELV),也就是最合适患者的 PEEP 值。他们对 16 例接受机械通气的 ARDS 患者进行 EIT 监测以及 PEEP 试验,结果表明,与对照组比较,通过呼气末阻抗梯度设置后的平均 PEEP 水平更高,患者氧合指数改善,驱动压降低,同时肺背侧区域塌陷状态改善,肺腹侧区域过度通气减少。相比像素顺应性,呼气末阻抗梯度无需复杂计算,由 EIT 设备直接绘制出,趋势变化更为直观,适宜临床手术室、病床边操作使用。

可复张的肺容积 可复张的肺容积 (PRLV) 指通过鼓肺手法能够增加的肺容积,反映肺塌陷的程度。Lowhagen 等^[12]对 16 例急性肺损伤 (ALI) 患者计算 PRLV,结果表明,不同患者 PRLV 值差异较大,若对低 PRLV 患者使用高 PEEP 可能有害,而个体化 PEEP 设定则有助于治疗。计算可复张肺容积方法较为复杂,需要通过氮冲洗方式获得 EELV 基线,并需经过 EIT 校准,因此目前临床应用较少。

DOI: 10.12089/jca.2020.12.020

作者单位: 200025 上海交通大学医学院附属瑞金医院麻醉科
通信作者: 罗艳, Email: ly11087@rjh.com

通气均匀性指数 在 EIT 研究中衍生了一系列参数用于描述通气均匀性,包括通气中心(COV)、不均匀性(GI)、局部通气延迟(RVD)、潮气内分布(ITV)。随着 EIT 认知的深入,有些参数已被简化或取代,但均匀通气仍是临床医师的目标,通气均匀性相关参数仍在 EIT 领域占据不可替代的地位。

(1) COV。COV 曾被描述为“重心”(COG),它代表肺背侧通气量占全部通气量的比值,比值越大说明肺背侧通气越多。COV 是经典的通气均匀性参数之一,可以作为一个敏感指标描述 PEEP 试验过程中引起的通气变化。Karsten 等^[13]观察了 32 例腹腔镜胆囊切除患者不同 PEEP 设置后的 COV 差异,提示 COV 能够敏感反映出肺内通气变化,并且随着 PEEP 提高通气不仅仅向背侧移动,且向肺左叶移动。He 等^[14]优化了 COV 指数,将 EIT 图像分为上下 2 个区域,若在 PEEP 递减试验中发现图像上部(肺腹侧通气区域)最小,图像下部(肺背侧区域)最大认为达到了最佳的通气状态。研究观察 50 例行腹腔镜手术患者,结果显示,通过该方法进行 PEEP 优化有助于氧合指数的提高。COV 的优势在于不需要复杂计算,直观显示通气分布状态,经过改良的 COV 能够适于床旁迅速判断肺通气均匀性并指导呼吸参数设置。

(2) GI。GI 不均匀性是根据像素值差异计算的通气均匀性指标,通过计算 EIT 图像中通气区域阻抗的中间值与各像素之间差异总和,再除以所有像素总阻抗的变化后得出。GI 越小,说明肺通气越均匀。Zhao 等^[15]通过 30 例 ARDS 患者同时观察几个 EIT 衍生指标,研究表明,与像素顺应性比较,GI 能够更好计算最佳 PEEP。与 COV 比较,GI 计算每个像素和整体之间的差异,能够更为精确计算通气均匀性。

(3) RVD。RVD 指数是通过时间差异计算得到的参数,根据 EIT 不同像素吸气开始时间和整体吸气开始时间差生成 RVD 分布图,计算出标准差。它考虑所有像素的可变性,与肺周期性开闭有密切关联,能够用于 PEEP 试验。有研究表明,根据 RVD 指数设置 PEEP 能够减少肺部炎性产物积蓄,符合当代肺保护性通气标准^[16]。Hochhausen 等^[17]横向比较了 GI 和 RVD 两个参数,表明两者均能很好地反映肺通气分布情况。

(4) ITV。ITV 是以整体的潮气量变化作为参考值,对不同吸气阶段的不同区域进行量化得到的参数,是通气量在 EIT 监测中的反映。Blankman 等^[18]对 12 例心脏术后患者进行 ITV 监测,结果提示,ITV 与肺动态顺应性有很好的相关性。由于 ITV 与潮气量密切相关,能很好反映肺通气变化,所以可以通过 PEEP 试验确定患者最佳 PEEP 值。

因此,根据潮气量变化、通气时间、像素值差异、通气分布等变量衍生出不同的 EIT 参数均可以指导个体化 PEEP 设置,它们的目标都是为患者确定最佳 PEEP 水平,达到更均匀的通气状态,减少肺部损伤。Karsten 等^[19]横向比较了这些参数,结果表明,大部分 EIT 衍生指标均能够显著改善患者氧合,提高肺顺应性。因此,在实际临床操作中,不建议

精确算出各个指数结果,而是结合患者所处环境及自身状态,根据 EIT 图像以及最简单的参数做出调整,达到即时监测、迅速改善肺通气的目的。

EIT 指导个体化 PEEP 的局限性

呼吸参数设置必须考虑到患者病理生理特点^[20],以往的 PEEP 设置难以反映患者通气是否均匀,因此需要更直观、更完整、更个体化的方法进行 PEEP 设置^[21]。EIT 通过直观显示肺通气变化,在呼吸参数设置中展现出一定的优势。但 EIT 指导 PEEP 设置在临床监测、参数解读以及临床应用仍然存在一定局限。

监测方面的局限 由于 EIT 设备监测的是胸腔的其中一个条带,仅仅反映了该区域内随时间变化的图像,难以反映肺部整体情况。Bikker 等^[22]在 12 例心脏术后机械通气患者身上放置 2 组 EIT 装置观察 PEEP 对肺通气分布的影响,结果表明,当 PEEP 逐渐增加过程中,肺通气分布不仅存在由腹侧向背侧的转变,还存在由头端向尾端移动的现象,可见同一患者肺部不同位置的通气也存在差异。因此 EIT 监测的单一平面的通气改善能否改善整体通气情况,对其他肺区域会产生怎样影响,仍需要进一步研究来证实。

参数解读的局限 随着 EIT 研究的深入,围绕 EIT 衍生众多参数有不同解读方式,对相关参数选择也存在争议。例如 Blankman 等^[18]提出 GI、RVD 指数不适合作为 PEEP 选择,而 Zhao 等^[15]则对此提出反对意见,认为 GI 相比其他参数有更大优势。此外,不同学者对最佳 PEEP 的理解也存在差异。EIT 选择的最佳 PEEP 与机械通气指南推荐的 PEEP 数值也相差较大^[23],由于缺少大样本随机对照试验证据支持,难以验证 EIT 指导个体化 PEEP 设置给患者远期预后带来的获益。

应用方面的局限 EIT 是通过身体表面电流变化感知内部电阻的精密仪器,若有(单极或双极)电刀、超声刀等干扰则无法进行测量,甚至造成机器损坏。此外,完整 PEEP 试验时间往往超过 30 min,限制其在临床应用。Karsten 等^[19]将 PEEP 试验缩短为 10 min,一定程度上增加可行性。但 Hsu 等^[24]研究表明,PEEP 改变后 1 h 内 EELI 都在变化,短时间的 PEEP 试验能否准确判断患者肺通气仍存在疑虑。

虽然存在争议与局限,但 EIT 仍在发展中,关于胸部 EIT 的共识也已发表^[25],并规范了术语、给出了临床应用建议和未来的展望。随着研究的深入,相信 EIT 的理论依据会更加充分、设备精度和分辨率会更高,在临床有更广泛的应用。

小 结

机械通气易造成肺通气不均,导致肺不张,增加患者肺部并发症的发生率。PEEP 能够改善肺不张状态,但 PEEP 设置不当也会造成肺损伤。EIT 能够通过监测像素顺应性、呼气末肺阻抗梯度、可复张肺容积、通气均匀性来寻找最佳 PEEP,并且提示最佳 PEEP 状态下能够增加患者肺顺应性、

提高氧合指数、改善通气分布等。虽然 EIT 的临床应用存在局限,但 EIT 仍在一定程度能够改善通气、减少肺损伤,值得进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Victorino JA, Borges JB, Okamoto VN, et al. Imbalances in regional lung ventilation; a validation study on electrical impedance tomography. *Am J Respir Crit Care Med*, 2004, 169(7): 791-800.
- [2] Tomicic V, Cornejo R. Lung monitoring with electrical impedance tomography: technical considerations and clinical applications. *J Thorac Dis*, 2019, 11(7): 3122-3135.
- [3] Hedenstierna G, Tokics L, Scaramuzzo G, et al. Oxygenation impairment during anesthesia; influence of age and body weight. *Anesthesiology*, 2019, 131(1): 46-57.
- [4] 谭义文, 田毅, 魏晓, 等. 肺保护性通气可减轻中度慢性阻塞性肺疾病老年患者围术期肺部感染. *临床麻醉学杂志*, 2017, 33(7): 660-663.
- [5] 赵亚杰, 曹江北, 米卫东. 肺保护性通气策略在围手术期的应用进展. *临床麻醉学杂志*, 2016, 32(12): 1229-1232.
- [6] Writing Group for the Alveolar Recruitment for Acute Respiratory Distress Syndrome Trial (ART) Investigators, Cavalcanti AB, Suzumura EA, et al. Effect of lung recruitment and titrated positive end-expiratory pressure (PEEP) vs low PEEP on mortality in patients with acute respiratory distress syndrome; a randomized clinical trial. *JAMA*, 2017, 318(14): 1335-1345.
- [7] 王芹, 谢红, 朱江, 等. 全麻手术患者容量控制通气时的适宜 PEEP; 肺阻抗断层成像技术监测. *中华麻醉学杂志*, 2019, 39(7): 848-851.
- [8] Zhao Z, Chang MY, Chang MY, et al. Positive end-expiratory pressure titration with electrical impedance tomography and pressure-volume curve in severe acute respiratory distress syndrome. *Ann Intensive Care*, 2019, 9(1): 7.
- [9] Francheineau G, Bréchet N, Lebreton G, et al. Bedside contribution of electrical impedance tomography to setting positive end-expiratory pressure for extracorporeal membrane oxygenation-treated patients with severe acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 196(4): 447-457.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Lowhagen K, Lindgren S, Odenstedt H, et al. A new non-radiological method to assess potential lung recruitability; a pilot study in ALI patients. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2011, 55(2): 165-174.
- [13] Karsten J, Luepschen H, Grossherr M, et al. Effect of PEEP on regional ventilation during laparoscopic surgery monitored by electrical impedance tomography. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2011, 55(7): 878-886.
- [14] He X, Jiang J, Liu Y, et al. Electrical impedance tomography-guided PEEP titration in patients undergoing laparoscopic abdominal surgery. *Medicine (Baltimore)*, 2016, 95(14): e3306.
- [15] Zhao Z, Lee LC, Chang MY, et al. The incidence and interpretation of large differences in EIT-based measures for PEEP titration in ARDS patients. *J Clin Monit Comput*, 2020, 34(5): 1005-1013.
- [16] Haase J, Buchloh DC, Hammertmüller S, et al. Mechanical ventilation strategies targeting different magnitudes of collapse and tidal recruitment in porcine acid aspiration-induced lung injury. *J Clin Med*, 2019, 8(8): 1250.
- [17] Hochhausen N, Orschulik J, Follmann A, et al. Comparison of two experimental ARDS models in pigs using electrical impedance tomography. *PLoS One*, 2019, 14(11): e0225218.
- [18] Blankman P, Hasan D, Erik G, et al. Detection of 'best' positive end-expiratory pressure derived from electrical impedance tomography parameters during a decremental positive end-expiratory pressure trial. *Crit Care*, 2014, 18(3): R95.
- [19] Karsten J, Grusnick C, Paarmann H, et al. Positive end-expiratory pressure titration at bedside using electrical impedance tomography in post-operative cardiac surgery patients. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2015, 59(6): 723-732.
- [20] Gattinoni L, Marini JJ, Collino F, et al. The future of mechanical ventilation; lessons from the present and the past. *Crit Care*, 2017, 21(1): 183.
- [21] Gordo F, Conejo I. What PEEP level should I use in my patient. *Med Intensiva*, 2017, 41(5): 267-269.
- [22] Bikker IG, Preis C, Egal M, et al. Electrical impedance tomography measured at two thoracic levels can visualize the ventilation distribution changes at the bedside during a decremental positive end-expiratory lung pressure trial. *Crit Care*, 2011, 15(4): R193.
- [23] Heines S, Strauch U, van de Poll M, et al. Clinical implementation of electric impedance tomography in the treatment of ARDS; a single centre experience. *J Clin Monit Comput*, 2019, 33(2): 291-300.
- [24] Hsu CF, Cheng JS, Lin WC, et al. Electrical impedance tomography monitoring in acute respiratory distress syndrome patients with mechanical ventilation during prolonged positive end-expiratory pressure adjustments. *J Formos Med Assoc*, 2016, 115(3): 195-202.
- [25] 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.

(收稿日期: 2019-12-22)