

电阻抗成像技术在急性呼吸窘迫综合征病情监测中的应用与发展

朱佳燕^{1,2}, 甘桂芬²

1. 青海大学研究生院临床医学系, 青海 西宁 810000; 2. 青海大学附属医院重症医学科, 青海 西宁 810000

【摘要】 急性呼吸窘迫综合征是以急性低氧性呼吸衰竭为特征, 胸部影像学显示双侧肺组织浸润渗出, 不能完全用心力衰竭或体液超载来解释。目前, CT 扫描常用于急性呼吸窘迫综合征的分类和预后, 但受限于危重患者转运不便等情况, 此项检查无法满足实时监测肺组织通气与灌注的需求。电阻抗断层扫描的出现很好的解决了这一问题。电阻抗断层扫描作为一项新兴的功能性成像技术, 能够无创、实时地评估肺部通气和灌注情况, 从而协助急性呼吸窘迫综合征诊断、评估危重程度、优化患者机械通气参数以及疗效评估。本文主要对电阻抗成像技术在急性呼吸窘迫综合征患者病情监测中的研究进展进行讨论。

【关键词】 急性呼吸窘迫综合征; 电阻抗断层扫描; 机械通气; 肺成像

【中图分类号】 R563.8

【文献标志码】 A

【文章编号】 1672-6170(2024)04-0029-04

Application and development of electrical impedance tomography in monitoring the conditions of acute respiratory distress syndrome ZHU Jia-yan^{1,2}, GAN Gui-fen² 1. Department of Clinical Medicine, Graduate School, Qinghai University, Xining 810000, China; 2. Department of Critical Medicine, The Affiliated Hospital of Qinghai University, Xining 810000, China

【Corresponding author】 GAN Gui-fen

【Abstract】 Acute respiratory distress syndrome (ARDS) is characterized by acute hypoxemic respiratory failure. The chest imaging shows the bilateral pulmonary infiltration and exudation. These cannot be fully explained by heart failure or fluid overload. Currently, computed tomography (CT) is commonly used for the classification and the prognosis of patients with ARDS. However, due to the inconvenience of transporting critically ill patients, this examination cannot meet the needs of real-time monitoring of ventilation and perfusion of lung tissue. The emergence of electrical impedance tomography (EIT) has solved this problem very well. As an emerging functional imaging technology, EIT can real-time assess the lung ventilation and perfusion non-invasively. Thus, it assists in the diagnosis of ARDS, evaluates the severity of illness, optimizes the mechanical ventilation parameters for patients, and assesses the treatment effectiveness. This article mainly discusses the research progress of EIT technology on monitoring the conditions of ARDS patients.

【Key words】 Acute respiratory distress syndrome; Electrical impedance tomography; Mechanical ventilation; Lung imaging

急性呼吸窘迫综合征 (acute respiratory distress syndrome, ARDS) 是由急性肺损伤 (acute lung injury, ALI) 导致弥漫性肺泡损伤、肺血管通透性增加、肺体积缩小为主要病理学特征的一种临床综合征, 约有 10% 的 ICU 患者罹患此病, 其死亡率一直高达 30% ~ 40%^[1]。研究显示, ARDS 患者肺泡上皮和肺毛细血管内皮损伤, 导致炎性水肿液在肺泡和肺泡间隙积聚, 使肺泡塌陷, 肺容积减少、肺顺应

性降低、通气血流比例失调, 进一步影响了肺的气体交换功能^[2]。这种通气/灌注不匹配程度与 ARDS 预后密切相关, 而精确评估和管理这种不匹配是改善 ARDS 患者预后的重要策略之一^[3]。

电阻抗断层成像 (electrical impedance tomography, EIT) 具有无创、实时、连续、无辐射、可进行床旁监测 ARDS 患者区域通气分布的独特优势^[4]。近年来, EIT 技术有了进一步的发展, 通过分析高渗盐水造影剂推注后的首过动力学, 实现对区域肺灌注的定量估计^[5]。这一方法在多项研究中得到了验证^[6, 7]。因此, EIT 可全面评估每位患者通气/灌注不匹配程度^[8], 并逐渐在危重患者的临床应用中展现出其潜力。

1 EIT

1.1 EIT 基本原理 EIT 技术是一种新型医学功能成像技术, 其基本原理在于利用机体不同组织细胞的电导率差异来实现成像^[9], 由于在低频时细胞膜的导电性很弱, 电流绕过细胞在细胞外液中曲线

【基金项目】 青海大学附属医院重症医学科国家级临床重点专科建设项目; 青海大学附属医院重症医学科省临床重点专科建设项目

【通讯作者简介】 甘桂芬, 女, 主任医师, 博士研究生导师。青海省医师协会重症医师分会主任委员, 青海省医学会细菌感染与耐药菌防治分会主任委员, 青海省医师协会体外生命支持专业委员会主任委员, 青海省医学会重症医学分会副主任委员, 中国医师协会重症女医师分会常务委员, 中国研究型医院协会肠内肠外营养分会常务委员, 中国医师协会重症医师分会委员, 中华医学会细菌感染与耐药菌防治分会委员。主要研究方向: 高原呼吸危重症。

前进;而在高频情况下,细胞膜的导电性增强,电流就能直接穿过细胞直线前进^[10]。EIT 就是通过生物体表面配置电极阵列,根据电流和电压之间的关系,运用相应的图像重构算法,对目标内部的实际阻抗或者阻抗变化进行重建成像^[11]。

1.2 EIT 肺功能监测的工作原理 EIT 成像技术已被用于多个领域,包括肺功能成像、乳腺癌的早期检测^[12]、脑出血以及短暂性脑缺血等方面的临床研究^[11]。其中肺功能成像是目前 EIT 最主要的应用领域^[12]。与传统影像成像技术和常规肺功能监测相比,EIT 能够通过测定不同通气状况下的电阻抗变化,实时、动态地监测肺部的通气血流分布^[13](可以监测胸腔内通气分布以及通气响应阻抗变化所反映的局部和整体呼吸力学),这是因为 EIT 图像重建的核心在于精准估计呼吸过程中肺部电阻率的变化。研究显示,深呼吸时,电阻率甚至可以上升两倍以上^[14],且与肺部进气量密切相关。

肺 EIT 通过围绕胸壁放置的 16 或 32 个电极来实施,精确地判定通电电极和测量电极对之间的生物电阻抗^[15]。在检测过程中,EIT 通过成对电极施加微小的交流电来测量胸阻抗,精准描绘出通气(空气运动)和灌注(血液运动)的区域变化。由于气体为高电阻,血流为低电阻,同一位置测得电阻抗会随着通气和血流的变化而发生变化,肺内气体量的增加和血容量的减少都会导致电导率降低^[16]。研究表明,在安静呼吸时,肺组织阻抗变化约 5%,而在深呼吸中,这种变化可达到 300%。而肺灌注导致收缩期和舒张期之间的阻抗变化约 3%。因此,全局肺电阻抗的变化主要与潮气量有关,EIT 可以监测生理及病理状态下肺通气及灌注过程中的电阻抗变化,从而应用于呼吸系统的肺功能成像^[17]。

2 EIT 在 ARDS 病情监测中的临床价值

2.1 EIT 协助制定 ARDS 的肺保护性通气策略

在治疗 ARDS 的过程中,肺保护性通气策略扮演着至关重要的角色。2000 年发表的急性呼吸窘迫综合征网络试验(acute respiratory distress syndrome network trial,ARMA)是一项具有里程碑意义的临床试验,旨在研究肺保护性通气策略对 ALI 和 ARDS 患者的影响^[18]。该研究^[19]共招募了 861 例 ALI 或 ARDS 患者,其中传统通气组潮气量为理想体重的 12 ml/kg,平台压为 50 cmH₂O 或更低;而肺保护通气组则接受较低潮气量的通气,潮气量为理想体重的 6 ml/kg,平台压为 30 cmH₂O 或更低。结果显示,接受较低潮气量和较低平台压的肺保护性通气组死亡率为 31.0%,而传统通气组的死亡率为

39.8%。因此可知,这种肺保护性通气策略(包括低潮气量和平台压力以保护“婴儿肺”^[20]、使用呼气末正压通气(positive end-expiratory pressure, PEEP)和肺复张来减少非通气肺组织的量、采用俯卧位通气来增加肺部通气的均匀性,从而改善通气/血流比例和肺/胸壁形状的匹配度),可明显改善中、重度 ARDS 患者的预后^[21]。

EIT 技术有助于了解 ARDS 肺保护性通气策略中的多种干预措施的基本机制。首先,EIT 实时监测患者俯卧位通气时肺部通气和血流分布状况的动态变化信息,对及时调整治疗方案、优化俯卧位角度和时间具有重要的指导意义。同时,EIT 可以指导有创机械通气过程中 PEEP 滴定。通过精确测量和调整呼气末正压,显著改善与肺募集相关的生理和机械参数,从而有效提高患者的呼吸功能和预后^[22]。

2.2 EIT 个体化滴定最佳 PEEP 多项研究通过对机械通气的 ARDS 患者逐步增加和降低 PEEP 水平,利用 EIT 技术精确测量全肺及区域性肺部通气分布,显示 PEEP 的变化对肺泡扩张/塌陷的影响,实现了 EIT 对 PEEP 最佳值的滴定。Costa 等^[23]通过研究发明了递减 PEEP 试验:在最大肺复张之后进行递减性 PEEP 滴定区域顺应性的变化,并根据实验结果推测,最高 PEEP 水平下区域顺应性的降低可能是由于肺泡过度膨胀,最低 PEEP 水平下区域顺应性的降低则可能是由于肺泡萎陷。基于区域顺应性的这种变化,通过计算递减滴定 PEEP 过程中整个肺的过度膨胀和萎陷的百分比,绘制相应曲线,曲线交点对应的 PEEP 值被定义为最佳 PEEP。该研究采用了计算机断层扫描(CT)作为对照方法,结果表明,EIT 技术能够精确监测肺部肺泡扩张/塌陷区域的位置和数量,与 CT 测量结果高度一致。

Zhao 等^[24]对递减 PEEP 法和静态压力-容积(PV)曲线法这两种 PEEP 滴定方案进行了比较。在 PEEP 滴定两小时后,采用 EIT 技术的患者其肺静态顺应性和驱动压的表现均显著优于使用 PV 曲线法的患者。此外,一项单中心随机交叉试验表明,与 ARDS net 提出的高 PEEP-FiO₂表格^[25]相比,EIT 引导的 PEEP 滴定可降低中度至重度 ARDS 患者的机械功率,生存率明显升高^[26]。然而,也有一项研究指出,递减 PEEP 法滴定个体化 PEEP 也可能导致 ARDS 患者的肺泡遭受过度膨胀和塌陷的双重损伤^[27]。但是,总体而言 EIT 技术在引导个体化 PEEP 滴定方面对重症 ARDS 患者来说利大于弊。

2.3 EIT 监测 ARDS 患者的通气和灌注 对接受

机械通气的 ARDS 患者,理想的临床监测应该同时监测肺通气、肺灌注以及两者的匹配度。过高的 PEEP 会引起肺灌注不足,过低的 PEEP 无法维持复张肺泡的开放,这为 EIT 引导 PEEP 滴定提供了新的思路。Spinelli 等^[3]研究了 50 例不同严重程度的 ARDS 患者,使用 EIT 监测 ARDS 患者的通气和灌注时,发现较高的 PEEP 可能对缺氧较严重的患者有益,而对肺泡顺应性较高的患者则有害。这一发现强调了 EIT 在实时监测通气灌注匹配变化中的潜力,以协助 PEEP 设置和评估患者病情的重要性。同时,该研究还发现 V/Q 比值不匹配肺单位的百分比是 ARDS 患者病死率的独立预测因子,进一步证实了 EIT 在评估 ARDS 严重性和识别死亡风险较高的患者方面的应用价值。

此外,涉及 EIT 进行肺通气评估的研究显示,俯卧位通气对 ARDS 患者肺组织局部气体再分布、改善肺泡复张和肺均匀性^[28]方面有显著影响。Zarantonello 等^[29]使用 EIT 评估一例 ARDS 患者的肺通气和灌注,发现俯卧位后胸部背侧的通气增加,并且通气和灌注的总不均一指数下降,显示俯卧位可以改善通气和灌注的均匀性,增加通气灌注匹配。Fossali 等^[30]对新型冠状病毒感染(COVID-19)导致的 ARDS 患者进行 EIT 测量,发现俯卧位后肺腹侧死腔减少,死腔/分流比显著下降,通气灌注匹配改善。为进一步研究,Wang 等^[31]使用高渗盐水做造影剂,增强 EIT 对 ARDS 患者的通气-灌注匹配进行了测量,结果显示通气灌注匹配区域随俯卧位持续时间延长而显著增加,分流率则显著下降,表明延长俯卧位通气时间可以改善通气-灌注匹配度。此外,Roldán 等^[32]通过高渗盐水增强造影 EIT 测量肺灌注,结合肺部超声与呼吸参数评估从仰卧位到两侧侧卧位的体位复张操作的效果,发现体位复张操作后,患者灌注的背侧分布增加。因此,EIT 方法也可用于肺复张操作期间的效果评估和动态监测。

2.4 EIT 在 ARDS 并发症早期预警中的作用 机械通气的 ARDS 患者常并发气胸。EIT 已被用于实时检测气胸的存在。Hahn 等^[33]通过实验模型研究了诱导不同程度气胸后 EIT 图像的变化。他们发现,通气图中阻抗的增加(静态变化)与区域通气量的减少(动态变化)有关。将这些发现与 CT 图像进行比较,证明了 EIT 能够实时检测气胸。Morais 等^[34]的研究发现,ARDS 患者出现气胸是病程后期进行肺复张操作的并发症。故可以用 EIT 实时监测 ARDS 患者,使其在发生气胸之前早期中断肺复张操作。

另有研究发现^[35],EIT 技术在无创监测肺水肿方面展现出巨大潜力。通过对 ALI 猪模型在不同体位(仰卧位、45°左侧卧位、45°右侧卧位)下的肺功能显像进行监测,EIT 能够计算出肺水比,这一结果与处死后通过血管外肺水重量分析法所得的结果高度相关,提示 EIT 技术能够准确反映肺水肿的程度,而无需进行有创性的操作。

3 总结

尽管 EIT 技术在 ARDS 病情监测中展现出了巨大的潜力,但其仍存在一定局限性和挑战。其中最主要的问题是空间分辨率相对较低,这会影响成像的精细度和准确性。此外,由于受试者间的变异性较大,EIT 成像结果可能存在一定的差异。同时,电极运动产生的伪影和接触质量差也可能对成像结果造成干扰。但是,EIT 技术通过实时监测肺灌注和通气功能的变化,为临床诊疗提供了有力的支持。未来,随着医学技术的不断进步,EIT 技术有望在 ARDS 病情监测、管理死亡风险较高的患者以及肺保护性通气治疗方面发挥更大的作用。

【参考文献】

- [1] Matthay MA, Zemans RL, Zimmerman GA, et al. Acute respiratory distress syndrome [J]. *Nature Reviews Disease Primers*, 2019, 5(1):18.
- [2] Gorman EA, O'kane CM, McAuley DF. Acute respiratory distress syndrome in adults: diagnosis, outcomes, long-term sequelae, and management [J]. *Lancet*, 2022, 400(10358): 1157-1170.
- [3] Spinelli E, Kircher M, Stender B, et al. Unmatched ventilation and perfusion measured by electrical impedance tomography predicts the outcome of ARDS [J]. *Crit Care*, 2021, 25(1): 192.
- [4] Spinelli E, Mauri T, Fogagnolo A, et al. Electrical impedance tomography in perioperative medicine: careful respiratory monitoring for tailored interventions [J]. *BMC Anesthesiol*, 2019, 19(1): 140.
- [5] Martin KT, Xin Y, Gaulton TG, et al. Electrical Impedance Tomography Identifies Evolution of Regional Perfusion in a Porcine Model of Acute Respiratory Distress Syndrome [J]. *Anesthesiology*, 2023, 139(6): 815-826.
- [6] Kircher M, Elke G, Stender B, et al. Regional Lung Perfusion Analysis in Experimental ARDS by Electrical Impedance and Computed Tomography [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2021, 40(1): 251-261.
- [7] Borges JB, Cronin JN, Crockett DC, et al. Real-time effects of PEEP and tidal volume on regional ventilation and perfusion in experimental lung injury [J]. *Intensive Care Med Exp*, 2020, 8(1): 10.
- [8] He H, Chi Y, Long Y, et al. Influence of overdistension/recruitment induced by high positive end-expiratory pressure on ventilation-perfusion matching assessed by electrical impedance tomography with saline bolus [J]. *Critical Care (London, England)*, 2020, 24(1): 586.
- [9] Schwan HP. Electrical properties of tissue and cell suspensions [J].

Adv Biol Med Phys, 1957, 5: 147-209.

- [10] 余林君, 周睿, 潘盼, 等. 电阻抗断层成像技术在肺灌注中的研究进展 [J]. 生物医学工程学杂志, 2023, 40(6): 1249-1254.
- [11] Ke XY, Hou W, Huang Q, et al. Advances in electrical impedance tomography-based brain imaging [J]. Mil Med Res, 2022, 9(1): 10.
- [12] Halter RJ, Hartov A, Paulsen KD. A broadband high-frequency electrical impedance tomography system for breast imaging [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2008, 55(2 Pt 1): 650-659.
- [13] Sella N, Pettenuzzo T, Zarantonello F, et al. Electrical impedance tomography: a compass for the safe route to optimal PEEP [J]. Respir Med, 2021, 187: 106555.
- [14] Harris ND, Suggett AJ, Barber DC, et al. Applications of applied potential tomography (APT) in respiratory medicine [J]. Clinical Physics and Physiological Measurement, 1987, 8(4A): 155.
- [15] Stankiewicz-Rudnicki M, Gaszyński T, Gaszyński W. Assessment of regional ventilation in acute respiratory distress syndrome by electrical impedance tomography [J]. Anaesthesiol Intensive Ther, 2015, 47(1): 77-81.
- [16] 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 [J]. Thorax, 2017, 72(1): 83-93.
- [17] Pennati F, Angelucci A, Morelli L, et al. Electrical impedance tomography: from the traditional design to the novel frontier of wearables [J]. Sensors (Basel), 2023, 23(3): 1182.
- [18] Hoshino T, Yoshida T. Future directions of lung-protective ventilation strategies in acute respiratory distress syndrome [J]. Acute Med Surg, 2024, 11(1): e918.
- [19] Brower RG, Matthay MA, Morris A, et al. Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome [J]. N Engl J Med, 2000, 342(18): 1301-1308.
- [20] Gattinoni L, Pesenti A. The concept of "baby lung" [J]. Intensive Care Med, 2005, 31(6): 776-784.
- [21] Guérin C, Albert RK, Beitler J, et al. Prone position in ARDS patients: why, when, how and for whom [J]. Intensive Care Med, 2020, 46(12): 2385-2396.
- [22] Sud S, Friedrich JO, Adhikari NKJ, et al. Comparative effectiveness of protective ventilation strategies for moderate and severe acute respiratory distress syndrome: a network meta-analysis [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2021, 203(11): 1366-1377.
- [23] Costa ELV, Borges JB, Melo A, et al. Bedside estimation of recruitable alveolar collapse and hyperdistension by electrical impedance tomography [J]. Intensive Care Med, 2009, 35(6): 1132-1137.
- [24] 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]. Journal of Clinical Monitoring and Computing, 2020, 34(5): 1005-1013.
- [25] Somhorst P, Van Der Zee P, Endeman H, et al. PEEP-FiO2 table versus EIT to titrate PEEP in mechanically ventilated patients with COVID-19-related ARDS [J]. Critical Care (London, England), 2022, 26(1): 272.
- [26] Jimenez JV, Munroe E, Weirauch AJ, et al. Electric impedance tomography-guided PEEP titration reduces mechanical power in ARDS: a randomized crossover pilot trial [J]. Critical Care, 2023, 27(1): 21.
- [27] Van Den Berg M, Van Der Hoeven H. In Patients with ARDS, Optimal PEEP Should Not Be Determined Using the Intersection of Relative Collapse and Relative Overdistention [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2020, 202(8): 1189.
- [28] Brunin Y, Despres C, Pili-Floury S, et al. Lung recruiting effect of prone positioning in spontaneously breathing patients with COVID-19 assessed by electrical impedance tomography [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2021, 204(4): 476-477.
- [29] Zarantonello F, Andreatta G, Sella N, et al. Prone position and lung ventilation and perfusion matching in acute respiratory failure due to COVID-19 [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2020, 202(2): 278-279.
- [30] Fossali T, Pavlovsky B, Ottolina D, et al. Effects of prone position on lung recruitment and ventilation-perfusion matching in patients with COVID-19 acute respiratory distress syndrome: a combined ct scan/electrical impedance tomography study [J]. Crit Care Med, 2022, 50(5): 723-732.
- [31] Wang YX, Zhong M, Dong MH, et al. Prone positioning improves ventilation-perfusion matching assessed by electrical impedance tomography in patients with ARDS: a prospective physiological study [J]. Critical Care, 2022, 26(1): 154.
- [32] Roldán R, Rodríguez S, Barriga F, et al. Sequential lateral positioning as a new lung recruitment maneuver: an exploratory study in early mechanically ventilated Covid-19 ARDS patients [J]. Annals of Intensive Care, 2022, 12(1): 13.
- [33] Hahn G, Just A, Dudykevych T, et al. Imaging pathologic pulmonary air and fluid accumulation by functional and absolute EIT [J]. Physiol Meas, 2006, 27(5): S187-S198.
- [34] Morais CCA, De Santis Santiago RR, Filho JRBDO, et al. Monitoring of pneumothorax appearance with electrical impedance tomography during recruitment maneuvers [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2017, 195(8): 1070-1073.
- [35] Trepte CJC, Phillips CR, Solà J, et al. Electrical impedance tomography (EIT) for quantification of pulmonary edema in acute lung injury [J]. Critical Care (London, England), 2016, 20: 18.

(收稿日期:2024-06-03;修回日期:2024-06-09)

(本文编辑:侯晓林)