

急性呼吸窘迫综合征的肺力学表型与个体化 PEEP 设置

吴桂琴^{1,2} 王文欣²

1.青海大学临床医学院 青海 西宁 810000

2.青海红十字医院重症医学科 青海 西宁 810000

【摘要】：急性呼吸窘迫综合征（Acute Respiratory Distress Syndrome, ARDS）以肺内弥漫性炎症及氧合功能障碍为特点，对于机械通气而言存在极大的挑战，而肺力学表型能从 ARDS 的个体化治疗方面给机械通气提供一条崭新的道路，并且对于如何选择合理的机械通气参数（尤其是 PEEP）也提供了临床依据。本文综述了 ARDS 肺力学表型的分类方法及其在机械通气参数调整中的应用，重点探讨了基于不同肺力学表型进行 PEEP 个体化调节的研究进展和临床实践现状。对于机械通气来说，根据 ARDS 患者的肺力学表型调节合适的 PEEP 并应用于临床实践具有重大意义。

【关键词】：急性呼吸窘迫综合征，肺力学表型，个体化 PEEP，机械通气，肺保护性通气策略

DOI:10.12417/2705-098X.26.05.078

1 引言

ARDS 是临床医学中极为重要且高致死率的危重症之一，对于 ARDS 患者而言，机械通气是最常用的生命支持方式，而合理应用肺保护通气策略已成为目前的共识，尤其是呼气末正压（PEEP）的设置对于维持肺泡开放、改善气体交换及防止肺泡塌陷至关重要。研究发现在应用基于肺力学、气体交换和胸部 CT 评估的潜在类别分析将 ARDS 的肺力学表型分为可招募和不可招募两种，二者在肺顺应性、招募潜能及死亡率等均存在着明显的区别，强调着对于 PEEP 的个体化调节的重要性。以 EIT 为代表的新兴技术可实时无创地监测肺部各区域的通气分布及肺泡的开放和关闭状态，对于 PEEP 的个体化设定有着重要的指导意义。ARDS 的异质性不仅体现在肺部，还包括对于免疫炎症反应、肺间质细胞功能以及多脏器相互影响等多个层面，从而影响到后续的机械通气策略选择、通气模式的转换以及最终通气效果的不同。而作为过度通气诱发因素的肺成纤维细胞亚群的异质性和与免疫细胞在炎症启动、炎症维持与修复等各个环节上发挥不同的作用，这些为精准医学提供了一个潜在的目标。

2 急性呼吸窘迫综合征的肺力学表型分类

2.1 肺力学表型的定义与分类标准

急性呼吸窘迫综合征(ARDS)肺力学表型一般根据其肺顺应性、肺容积和气体交换情况的不同将患者分为低顺应性型（Low Compliant Type）和高顺应性型（High Compliant Type），不同力学表型对应着不同的状态即肺泡塌陷状态或肺泡过度膨胀的状态，低顺应性型患者常见有肺泡大面积塌陷，肺容积减小，气体交换受限；高顺应性型患者肺顺应性较好，多数肺泡处于开放状态，但可能存在其他类型的病理改变。除了传统的 ARDS 患者的两类肺力学表型划分之外，近年随着更多新的标准加入到 ARDS 诊断中，在运用计算机断层扫描 CT，电阻抗断层成像 EIT 及肺超声等方法进行影像学判断的同时加入新

的生物标志，这些方法增强了肺力学表型的临床相关性和识别准确性。如通过 CT 图像判断肺内气体和组织体积量化区分焦点型和非焦点型肺损伤。以 Gas Exchange Index（GEI）、Lung Compliance（CL）作为基础结合分析划分各表型以达到兼顾判断性能和判断效率的目的。新冠肺炎相关的 ARDS（CARDS）显示，肺力学表型存在不同亚型，部分患者为弹性较低、肺容量较高的“L 型”，也有类似于典型 ARDS 的“高弹性”表型，因此，在采用肺力学表型进行分类时应与病因、临床表现相结合。

2.2 肺力学表型的临床评估方法

传统的肺力学表型的评价方式主要是以肺顺应性测量及呼吸系统压力-容积曲线分析为主，这些方法只能反映整体肺部机械特性，不能观察到空间差异以及动态变化情况。近年来，先进的电阻抗断层成像（EIT）、肺超声及计算机断层扫描（CT）等技术被应用于肺力学表型的动态监测及量化评估。EIT 能够实时监测肺内气体分布的变化，用于评价肺的通气能力和过度膨胀的部位；肺超声是快速方便的床旁无创检查手段，可以协助发现肺实变、胸腔积液及肺泡萎陷等情况来辅助判断肺力学表型；而 CT 可以提供高分辨率的肺部解剖结构图像，在进行肺气体以及组织体积量化分析的基础上进行肺损伤形态学亚型的划分。再结合血液中一些生物标记物（如血清炎症因子、肺泡损伤标志物）及血流动力学参数等进行分析能够提高肺力学表型的识别率及实时性。通过不同的多模态技术组合将更好的反映出 ARDS 患者肺部的病理生理状况，也为更精确的设置 PEEP 及机械通气策略提供了更确切的信息。

3 个体化 PEEP 设置的理论基础与方法

3.1 PEEP 的生理作用及其在 ARDS 中的重要性

呼气末正压（PEEP）可使肺泡维持扩张状态，减少肺泡反复开放与关闭引起的肺损伤，且维持一定量的 PEEP 有利于维持肺泡通气分布、减少肺不张、减少 V/Q 比值失衡，改善氧合。

然而, PEEP 若设置过大, 则会出现肺泡过度膨胀, 出现肺组织的损伤、肺泡内压增加及炎症反应加重。ARDS 患者肺力学具有极高的异质性, 不同肺力学表型对于 PEEP 有不同的反应。例如, 新冠肺炎相关性 ARDS(C-ARDS)患者的肺泡募集能力(recruitability)存在较大差异, 一部分患者需要较高 PEEP 维持肺泡开放, 另外一部分患者在较高 PEEP 时容易出现肺泡过度膨胀, 故采取固定 PEEP 策略可能会出现部分患者肺泡过度膨胀或肺不张加重的情况, 从而加重肺损伤, 影响预后。因此, 对于不同肺力学表型病人采取不同的 PEEP 设置, 可能更有利于减轻呼吸机相关性肺损伤、改善氧合以及提高患者的生存率。

3.2 个体化 PEEP 设置的策略与技术

(1) 肺顺应性和压力-容积曲线调节法: 利用肺顺应性曲线, 使顺应性达到峰值附近, 或利用压力-容积曲线的“拐点”判定肺泡开启和过度膨胀阈值, 进行 PEEP 调节。

(2) 电阻抗断层成像(EIT)及肺超声实时监测: EIT 是床旁无创可实时反应肺通气分布成像技术, 及时发现肺泡过度膨胀及肺不张区域。EIT 引导下的 PEEP 递减试验能够通过检测过度膨胀与肺塌陷曲线上交点的瞬时值, 实现 PEEP 的个体化优化。同时, 肺超声技术可评价肺不张及肺泡招募情况以指导 PEEP 水平调整。

(3) 结合血流动力学与氧合指标进行综合评估: PEEP 的设置除了影响肺部以外, 还会间接影响心血管系统。根据血流动力学参数(心输出量、中心静脉压等)和氧合指标相结合的方式评估 PEEP 对肺循环以及全身循环造成的影响。采取整体监测, 防止 PEEP 对循环功能造成影响, 避免多器官功能受损。

3.3 个体化 PEEP 设置的挑战与局限性

(1) 临床操作复杂, 缺乏统一标准及规范化操作流程: 个体化 PEEP 设置需要借助不同的监测(如 EIT、肺超声、食管压监测等), 专业技能较多, 且操作复杂, 操作耗时较长, 加重了临床医生的工作负担。目前尚未有国际通用的个体化 PEEP 设置流程, 导致不同机构存在不同的设置流程, 操作不尽相同, 难以推广应用。

(2) 设备和技术可及性限制广泛应用: 如 EIT、食管压监测等高级监测方法在中小医院单独使用比较困难, 其原因是设备价格昂贵, 对操作者技术要求高。而且肺超声虽然比较容易推广, 但是由于对医生的技术水平要求较高。

(3) 缺乏充足大型随机对照试验验证对预后的影响: 目前部分小规模生理学研究以及观察性研究支持个体化 PEEP 的生理学方面的优点, 但是缺乏大规模随机对照试验验证个体化 PEEP 可以提高 ARDS 患者的生存率或者缩短他们的机械通气时间等。

(4) 患者异质性及动态变化增加调整难度: 由于 ARDS

患者的病情复杂多变, 肺力学、肺泡招募能力随病情变化, PEEP 需求动态调整, 会使得医生很难做出最合适的方案来调控 PEEP 大小。除此之外, 还有少数患者的合并症较多, 比如一些患者有心脑血管疾病史, 在给予 PEEP 的过程中就需要注意 PEEP 带来的血流动力学的影响。

(5) 目前存在很多争议的技术指标: 传统的“最佳顺应性” PEEP 设置策略的安全性有待商榷, 原因是可能低估了 PEEP 引起的过度膨胀风险; EIT 技术中的一些指标如全局不均匀指数(GI)也可能高估了 PEEP 的需求程度。至于各种监测指标究竟该如何结合应用以获得最佳的 PEEP, 还缺少达成一致性的结论。

4 个体化 PEEP 设置的临床研究进展

多项随机对照试验发现肺力学表型下的 PEEP 调整能够明显提升患者的氧合状态并降低肺损伤的标志物水平。随着 EIT 技术被广泛应用于指导个体化 PEEP 设置的调整, 能够精确地进行肺泡的招募与过度膨胀的识别, 以达到优化机械通气参数、减少肺损伤的目的。目前, IPER PEEP 试验仍在探索基于肺末正压容积(EELV)指导的 PEEP 个体化调整是否能够改善中重度 ARDS 患者临床复合终点(如 ICU 死亡率、通气无依赖天数及炎症标志物水平等)。与此同时, 系统综述和荟萃分析显示, 与传统固定 PEEP 设置相比, 个体化 PEEP 策略可以更好地改善氧合、肺顺应性, 并未带来明显的血流动力学不良事件, 可能较安全。也有研究证实个体化 PEEP 能够缩短机械通气时间及降低 ARDS 死亡率, 体现了其在预后的改善作用具有潜力。

5 未来研究方向与技术创新

对于未来有关个体化 PEEP 设置的技术研究而言, 开展技术创新以及通过大规模的临床试验及其重要, 通过多模态监测(如 EIT 监测、肺容积监测及血流动力学监测等)获得更多综合信息并集成相关参数分析, 有利于更好的调整个体化 PEEP。其次需要进行多中心、大样本随机对照试验来确定个体化 PEEP 方案应用于 ARDS 亚型或疾病的其他分型的长期疗效和安全性, 并且明确对患者的最终预后产生怎样的影响。此外还应注意监测 PEEP 调节过程中的血流动力学变化及出现的并发症, 并完善 PEEP 调节算法以减轻副作用; 还可结合技术上的应用对其他治疗(如俯卧位通气和神经肌肉阻滞等)进行联合研究。基于精准肺力学表型识别及动态 PEEP 调节, 未来将有可能使 ARDS 的机械通气管理向个性化、智能化管理发展, 使患者存活率与生活质量均得到显著改善。

6 结论

急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome)是一组极其异质性临床综合征, 通过对 ARDS 的肺力学表型进行识别有助于更好地根据不同的肺力学表型制定更加精准化的机械通气策略, 使肺泡得到最大程度地复张, 减小了肺泡过

度膨胀或反复塌陷所造成的机械通气相关肺损伤,提高了氧合水平,改善远期预后,从传统的“统一模式”转变为针对具体的肺部机械特性的个体化治疗。但目前对于个体化 PEEP 设置临床应用情况还不是很理想,存在诸多局限性。在本文看来,

未来发展的方向需重视技术突破与临床应用的紧密结合,先进的监测技术包括电阻抗断层成像(EIT)、超声肺成像以及各种呼吸力学实时监测设备可提供更加准确而方便的动态肺力学表型量化数据。

参考文献:

- [1] 齐红蕾,杨小娟,杨晓军,等.脓毒症导致的肺内源性与肺外源性 ARDS 患者炎症指标差异及预后影响因素分析[J].重庆医学,2025,54(06):1300-1306.
- [2] Ma W,Tang S,Yao P,et al.Advances in acute respiratory distress syndrome:focusing on heterogeneity,pathophysiology,and therapeutic strategies[J].Signal Transduction and Targeted Therapy,2025,10(1):75.
- [3] 马效禹,范得慧,王威威.电阻抗断层成像技术用于呼气末正压滴定的研究进展[J].临床麻醉学杂志,2024,40(02):185-189.
- [4] Santa Cruz R,Villarejo F,Irrazabal C,et al.High versus low positive end-expiratory pressure(PEEP)levels for mechanically ventilated adult patients with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome[J].Cochrane Database of Systematic Reviews,2021(3).