

ARDS 专题 · 综述

儿童急性呼吸窘迫综合征肺复张及 呼气末正压滴定方法

陈伟明 综述 陆国平 审校

(复旦大学附属儿科医院重症医学科, 上海 201102)

[摘要] 应用小潮气量及限制气道压力进行机械通气的策略在急性呼吸窘迫综合征中的应用已经得到公认。肺复张及呼气末正压(PEEP)滴定能提高氧合并进行肺保护,但是肺复张及 PEEP 设定方法一直存在争议,该文就呼吸窘迫综合征患儿的肺复张策略及 PEEP 滴定进行综述。

[中国当代儿科杂志, 2018, 20(9): 706-712]

[关键词] 急性呼吸窘迫综合征; 呼气末正压; 肺复张; 儿童

Lung recruitment maneuvers and positive end-expiratory pressure titration in children with acute respiratory distress syndrome

CHEN Wei-Ming, LU Guo-Ping. Department of Pediatric Emergency and Critical Care Medicine, Children's Hospital of Fudan University, Shanghai 201102, China (Email: 13788904150@163.com)

Abstract: The application of small tidal volume and the limitation of airway pressure during mechanical ventilation in acute respiratory distress syndrome (ARDS) are well accepted. Lung recruitment and positive end-expiratory pressure (PEEP) titration can improve oxygenation and protect the lungs. However, the approaches of lung recruitment and PEEP titration remain controversial. This article reviews the lung recruitment maneuvers and PEEP titration in children with ARDS.

[Chin J Contemp Pediatr, 2018, 20(9): 706-712]

Key words: Acute respiratory distress syndrome; Positive end-expiratory pressure; Lung recruitment; Child

自急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)协作网 2001 年报道小潮气量机械通气较传统潮气量机械通气能显著降低 ARDS 患者病死率^[1]以来,应用小潮气量通气的肺保护性通气策略已被广泛应用于临床。2015 年国际小儿 ARDS 专家共识^[2]对儿童肺保护性通气策略关于应用小潮气量及低气道压力(吸气平台压 ≤ 28 cm H₂O)均作出了量化描述,但是对于肺复张(lung recruitment)及呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)滴定方法在 ARDS 患者中的应用仍存在争议^[3]。

1 肺复张

肺复张是应用持续增加的气道压使萎陷肺泡开放,并施以足够的 PEEP 维持肺泡开放的一种临床操作。肺复张不仅要使萎陷的肺泡开放,更重要的是维持肺泡开放,其目的不仅是改善氧合,同时也是防止肺泡反复开放闭合引起剪切伤,是进行肺保护策略的重要组成部分^[4]。但由于肺复张操作需要采用超过常规水平的气道压力,对于肺复张是否会造成进一步肺损伤一直存在争议。因此临床实施肺复张策略必须重视在积极复张和避

免过度膨胀间寻找平衡点。

1.1 肺可复张性评价

Gattinoni 等^[5] 在一项对 68 名 ARDS 患者应用 CT 评价不同气道压下 (5、15、45 cm H₂O) 肺可复张性研究中发现, 潜在可复张肺的比例变化范围非常大, 与患者的 PEEP 设置显著相关。患者氧合指数 (PaO₂/FiO₂, P/F) 越低、顺应性越低、通气死腔量越大, 肺可复张性越高。据此得出 ARDS 患者具有肺可复张性潜力特征为: 在 PEEP 5 cm H₂O 时 P/F 比值 <150, 当 PEEP 从 5 cm H₂O 升到 15 cm H₂O 后, 肺顺应性增大, 通气死腔量减小, 建议对这些患者应用肺复张及更高的 PEEP。而在临床中 PEEP 的大小会影响 P/F 比值。Chiumello 等^[6] 研究认为, 只有在 PEEP 为 5 cm H₂O 时评价 P/F 比值才能够得出肺可复张性与 P/F 比值具有相关性: 严重 ARDS (P/F 比值 ≤ 100) 具有高可复张性, 而轻度 ARDS (P/F 比值 ≥ 200) 肺可复张性很小; 不同类型 ARDS 对于肺可复张性反应也不相同。Grasso 等^[7] 研究发现, 对于肺组织病变表现相对均一性的 ARDS 患者, 肺复张能带来更多的有益作用, 而非肺泡过度膨胀; 而局灶性 ARDS 患者实施肺复张常会引起肺泡过度膨胀, 血浆炎性因子升高, 加重肺损伤。国内 2016 年成人 ARDS 指南^[8] 中预测肺可复张性因素还包括: 早期 ARDS 患者 (机械通气 <48 h)、胸壁顺应性正常患者、应用低 PEEP 水平 ARDS 患者等。而对血流动力学不稳定和气压伤高风险人群实施肺复张应慎重。

1.2 肺复张方法

最常用的肺复张法为持续充气法, 指应用持续正压通气模式设置压力为 30~40 mm H₂O 持续 30~40 s。Meade 等^[9] 对 28 名 P/F 比值 <250 的 ARDS 患者研究发现, 应用持续充气法进行肺复张对氧合及呼吸力学指标无改善作用, 还会导致呼吸机不同步 (5/122)、患者不适感 (3/122)、低血压 (2/122) 及气压伤 (4/122)。ARDS 协作网对持续充气法进行肺复张研究发现, 在应用持续充气法进行肺开放操作后虽然有部分患者 (10/69) 经皮氧饱和度 (SPO₂) 上升 5%~9%, 但是也有患者 (14/69) SPO₂ 下降 1%~4% 及发生低血压, 因此 ARDS 协作网并不支持把肺复张作为 ARDS 常规治疗操作^[10]。

持续充气法肺复张对患者骤然施加极高气道压力, 导致患者耐受性差继而出现气压伤及血流动力学不稳定, 因此有学者推荐渐进式肺开放, 又称 PEEP 递增法。Marini 等^[11] 建议应用逐渐增高的 PEEP 水平来避免出现肺开放的不良反应, 具体操作为: 镇静肌松, 抑制自主呼吸, 采用定容模式设置潮气量为 6 mL/kg, 压力上限为 40 cm H₂O, 每 3~5 min 增加 PEEP 2~5 cm H₂O; 期间观察驱动压 (平台压 - PEEP)、肺顺应性、氧饱和度及血压。如果出现肺开放证据如驱动压下降 (顺应性增加)、平台压 <30 cm H₂O、SPO₂ 增高则继续增加 PEEP 水平; 若出现肺过度扩张证据如驱动压增加 (顺应性下降)、平台压 >30 cm H₂O、SPO₂ 下降及血压下降则降低 PEEP。最终滴定 PEEP 水平使驱动压及 SPO₂ 至合适水平^[11]。也可应用压力控制模式结合 PEEP 递增实现渐进式肺复张, 与定容模式比较哪种模式更优目前并无定论。

1.3 肺复张小结

其他肺复张方法包括应用特殊通气模式如压力释放通气保留自主呼吸进行肺开放操作、高频振荡通气获得较高的平均气道压肺开放, 以及应用呼吸机自带叹气法进行肺开放等^[12] (表 1)。目前为止, 未有研究证实何种肺复张法优于其他方式, 而且肺复张时最佳的气道压力、实施时间及频率仍不清楚^[8]。基于目前循证学证据^[13], PEEP 递增法肺复张较持续充气法肺复张更被推荐, 并没有证据等级高的研究可以证实肺复张能改善 ARDS 预后, 且肺复张会带来一定比例的不良反应, 如氧合及血压下降、气压伤等, 因此并不推荐作为 ARDS 患者的常规治疗。而对于肺可复张性评价能够尽可能使患者获益并降低不良反应, 如果进行肺复张操作有效, 滴定适当的 PEEP 维持肺泡开放就显得至关重要。儿童 ARDS 肺复张临床研究非常有限, 大多参照成人方法进行。Cruces 等^[14] 对 25 名儿童 ARDS 患者 (平均 P/F=117) 研究显示, 应用 PEEP 递增法进行肺复张使 ARDS 患儿肺顺应性及 P/F 比值明显改善 ($P<0.01$), 且在血流动力学稳定的情况下可以很好地耐受, 因此儿童 ARDS 最新指南^[15] 推荐谨慎的肺复张策略, 通过缓慢改变 PEEP 的步骤 (即 PEEP 递增法) 来提高严重低氧血症, 不推荐持续性肺膨胀策略。

表1 成人临床实施肺复张的常用方法^[12]

实施方法	具体操作
持续充气法	持续正压通气模式：设置压力为 30~40 cm H ₂ O，维持 30~40 s。
压力控制通气法	压力控制模式：调节吸气压为 10~15 cm H ₂ O，PEEP 25~30 cm H ₂ O，使峰压达 40~45 cm H ₂ O，维持 2 min。
渐进式肺复张 (PEEP 递增法)	定容模式：设置潮气量为 6 mL/kg，每 3~5 min 增加 PEEP 2~5 cm H ₂ O，逐步增加 PEEP 至平台压 >30 cm H ₂ O。当出现驱动压增高、SPO ₂ 下降或低血压时，开始下调 PEEP，至 SPO ₂ 、平台压及驱动压达合适水平。 定压模式：设定压力上限为 40 cm H ₂ O，每 30 s 增加 PEEP 5 cm H ₂ O，直到 PEEP 达到 30 mm H ₂ O，维持 30 s，然后逐步降低 PEEP 至基础水平。
叹气法 / 增强叹气法	每分钟 3 次连续的叹气呼吸，叹气呼吸时调节潮气量使平台压达到 45 cm H ₂ O。

2 PEEP 设定

肺复张后 PEEP 滴定可维持肺泡开放、增加功能残气量、改善通气血流比值进而改善氧合，同时也是减轻肺泡周期性复张和塌陷所致剪切伤的肺保护性通气策略之一。但过高的 PEEP 可能导致肺泡过度充气和循环抑制等不良反应，PEEP 设定同样需要平衡肺泡开放及过度充气，整合目前 ARDS 治疗关于 PEEP 设定的随机对照研究显示，高水平 PEEP (>12 cm H₂O) 不能改善 ARDS 患者的病死率，但对中重度 ARDS 患者可能有益^[16]。Gattinoni 等^[17]通过 Meta 分析认为，PEEP 设定应根据 ARDS 的严重程度，推荐轻度 ARDS 设置 PEEP 为 5~10 cm H₂O 水平，中度 ARDS 为 10~15 cm H₂O，重度 ARDS 为 15~20 cm H₂O。借鉴成人 ARDS 研究，2015 年儿童 ARDS 指南中对于 PEEP 设定建议适度增高 PEEP (10~15 cm H₂O) 来改善氧合，对于儿童严重 ARDS，PEEP 可高于 15 cm H₂O，滴定 PEEP 同时应当密切监护患儿氧合及血流动力学指标。但是新指南并未说明儿童 PEEP 滴定方法。成人设置 PEEP 的方法文献报道各不相同，目前并没有指南统一设定方法，主流设置方法介绍如下。

2.1 气体交换指标

2.1.1 PEEP-FiO₂ 表格法 ARDS 协作网研究所采用 PEEP-FiO₂ 表格法，即采用表格中 PEEP 和 FiO₂ 对应关系进行调节以达到氧合目标 (PaO₂ 55~88 mm Hg 和 SPO₂ 88%~95%)，此表分高 / 低水平 PEEP-FiO₂ 两个对应关系 (表 2)^[18]。该协作网建议具有肺复张潜力的中重度 ARDS 应用表格中高水平 PEEP-FiO₂，而低水平 PEEP-FiO₂ 常应用于轻度 ARDS。Chiumello 等^[6]在一项应用 PEEP-FiO₂ 表格法及肺顺应性、肺牵张指数、食道测压

指导 ARDS 患者 PEEP 设定的研究中发现，根据表格法设定的 PEEP 与肺复张程度的相关性优于其他三项指标。该表格法使用简单，易于临床推广，但也存在 PEEP 设定不个体化的缺点。

表2 ARDS 协作网应用的 PEEP-FiO₂ 对应表^[18]

分类	FiO ₂	PEEP (cm H ₂ O)
低 PEEP/ 高 FiO ₂	0.3	5
	0.4	5
	0.4	8
	0.5	8
	0.5	10
	0.6	10
	0.7	12
	0.7	14
	0.7	14
	0.8	14
	0.9	16
	0.9	18
高 PEEP/ 低 FiO ₂	1.0	18~24
	0.3	5
	0.3	8
	0.3	10
	0.3	12
	0.3	14
	0.4	14
	0.4	16
	0.5	16
	0.5	18
	0.5~0.8	20
	0.8	22
	0.9	22
	1.0	22~24

2.1.2 最小二氧化碳梯度 Suter 等^[19]早在 1975 年提出采用通气死腔分数最低化来设置最佳 PEEP。呼气末二氧化碳 (ETCO₂) 一定程度上由通气死腔决定。最佳 PEEP 可使肺复张或功能残气

量达到最佳而不出现过度肺泡扩张（通气死腔最小），优化通气与血流灌注比值从而减少肺内分流。因此 Murray 等^[20]建议应用使最小二氧化碳梯度（Pa-ETCO₂）<5 mm Hg 的 PEEP 做为最佳 PEEP。最近动物实验显示利用死腔分数滴定 PEEP 理论的正确性^[21]，使这种临床少用的方法有望得到开展。

2.2 最佳氧合 / 顺应性法

在 PEEP 递增或递减过程中，以达到最佳氧合或最佳顺应性来确定最佳 PEEP 也是临床常用方法之一。具体实施方法为：在应用 PEEP 递增法肺复张后，将 PEEP 设置在高水平（20~25 cm H₂O），然后每 5 min 递减 PEEP 2 cm H₂O，降低 PEEP 之后 5~15 min 测定动脉 PaO₂ 或肺顺应性。在 PEEP 递减过程中，当氧合或顺应性出现下降时即可确定最佳氧合或最佳顺应性对应的 PEEP。最佳 PEEP 设定为最佳氧合或最佳顺应性时的 PEEP+2 cm H₂O。然后再次肺复张后逐步降低 PEEP 至最佳 PEEP。最近一项 Meta 分析^[22]研究驱动压（driving pressure）与 ARDS 病死率之间的关系发现，当驱动压 >15 cm H₂O 时患者死亡风险增加，驱动压是肺顺应性公式的分母，即肺顺应性 = 潮气量 / 驱动压，这项研究证实了肺顺应性与 PEEP 滴定的关联。当 PEEP 不断增高引起肺过度扩张时，肺顺应性降低而驱动压会增高，增加 ARDS 患者的病死率；当 PEEP 增加引起肺复张改善肺部顺应性，则驱动压会降低。因此，最佳 PEEP 也可以理解为使驱动

压降低的 PEEP。

2.3 压力 - 容积曲线法

压力 - 容积（P-V）曲线是反映肺在吸气相及呼气相两者关系的曲线，常通过大注射器法或吸气相恒定低流速（<10 L/min）法进行测量，而在非恒定流速（如压力控制通气）、存在自主呼吸或吸气相高流速下测定常存在误差^[23]。目前有主流现代呼吸机（如 Galileo-Golden 呼吸机）带有 P-V 曲线测定工具。Amato 等^[24]通过分析 P-V 曲线吸气支，认为吸气支低位拐点（lower inflection point, LIP）代表大部分肺泡复张开始，而吸气支高位拐点（upper inflection point, UIP）代表肺泡过度扩张或肺复张结束，提出了最佳 PEEP 应设置为 LIP 以上 2 cm H₂O 维持肺泡开放，这也是临床应用广泛的 PEEP 滴定方法之一。但也有学者提出了利用 P-V 曲线的不足之处，如 P-V 曲线单室模型并不能反映 ARDS 肺部不均一性；P-V 曲线拐点不仅与肺复张有关，还可能受肺水肿因素的影响；而且通过 CT 图像显示肺复张持续在整个吸气支，UIP 并非肺复张终点，而呼气支最大曲率点（expiratory point of maximum curvature, PMC）代表肺复张结束，当呼气时气道压力低于 PMC 时，开始出现肺泡塌陷及氧合水平下降，因此理论上设定 PEEP 大于 PMC 是合理的^[25]（图 1）。另外还可以通过 P-V 曲线测定不同 PEEP 水平肺容量对 PEEP 肺复张进行评价来确定最佳 PEEP。

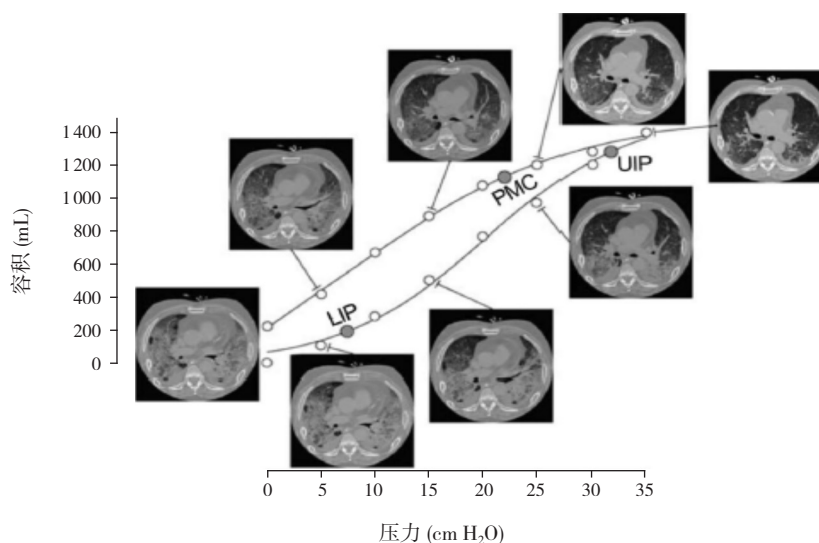


图 1 压力 - 容积（P-V）曲线各拐点及对应肺部 CT^[25] CT 图像显示 ARDS 患者在呼吸周期不同时相肺部影像变化，提示在呼气段压力大于 PMC 时相肺泡萎陷最小化，可以指导 PEEP 设定。[LIP] 低位拐点；[PMC] 呼气最大曲率点；[UIP] 高位拐点。

2.4 应力指数法

应力指数 (stress index, SI) 是在恒流送气的容量控制通气模式下, 患者没有自主呼吸努力, 根据压力时间曲线的形态通过回归方程计算而得^[26]。目前有主流呼吸机选配软件模块可实时监测 (如 Maquet Servo 系列), 当压力-时间曲线呈线性关系时 ($SI=1$) 提示肺泡复张且未出现过度扩张, 当吸气相肺顺应性降低, 压力-时间曲线呈下凹型 ($SI>1$), 提示肺泡过度扩张, 此时应降低 PEEP 或潮气量; 而当肺扩张时顺应性增大, 压力-时间曲线呈上凹型 ($SI<1$), 提示潮气量引起了肺复张, 此时会有更多肺复张潜力, 应增加 PEEP^[27]。其原理参照跨肺压 P-V 曲线, 当

PEEP 设置处于最佳功能残气量位置时, 患者吸气在压力容积曲线上应呈现出线性 (即 $SI=1$), 而反映在容控模式的压力-时间曲线上, 最佳 PEEP 应该使曲线呈线性表现^[26] (图 2)。Grasso 等^[28]在对 15 名 ARDS 患者研究中, 应用 SI 法对比根据 PEEP-FiO₂ 查表法设定的 PEEP, 发现查表法设定的 PEEP 会引起肺泡过度扩张, 应用 SI 方法设置 PEEP 可获得更好的肺顺应性。国内学者对比 SI 方法、最佳氧合、最佳顺应性及 P-V 曲线法设定 PEEP, 发现 SI 方法与最佳氧合法设定的 PEEP 均可获得最佳氧合效果^[29]。应用 SI 滴定 PEEP 目前临床并不常用, 尚需要更多研究证实其有效性。

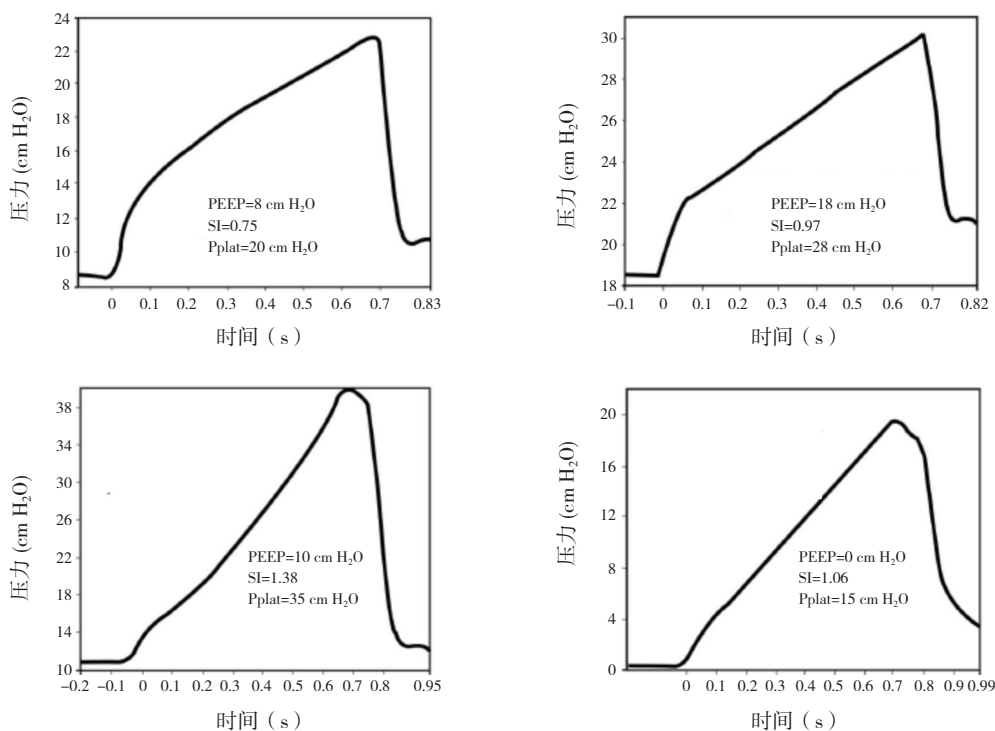


图2 应力指数法调节 PEEP 时不同 SI 压力-时间曲线形态^[26] 来自于一位早期 ARDS 患者。上排图片示 SI 随 PEEP 增加而改善, 下排图片示 SI 随 PEEP 下降而改善。[Pplat] 平台压; [PEEP] 气道末正压; [SI] 应力指数。

2.5 食道测压法

ARDS 患者胸壁顺应性降低 (肥胖、胸腔积液、腹高压等因素), 引起胸腔内压 (pleural pressure) 增高, 而胸腔内压增高常与肺泡压力增高相关。通过置入食道球囊对食道压间接评估胸腔压, 滴定 PEEP 使呼气末 PEEP 大于胸腔压, 维持肺泡在呼气末的开放状态, 同时通过调节平台压限制吸气末跨肺泡压 (跨肺压 = 平台压 - 胸腔

内压) <25 cm H₂O, 进行肺保护通气^[30]。Talmor 等^[31]研究发现, 应用食道测压法设定 PEEP, 较低水平 PEEP-FiO₂ 查表法能够获得更好的氧合及肺顺应性。由于食道测压需要专用测压管及特定呼吸机模块, 目前临床并未广泛开展。目前研究认为其对特定 ARDS 患者 (如肥胖及腹高压) 具有较好指导作用^[32]。

2.6 影像学

与呼吸力学指标不同的是,影像学指标作为 PEEP 设定还能够评价肺不均一性。CT 作为评价肺复张及肺过度扩张金标准已经在临床研究中应用,但是 CT 不能提供床边连续信息,因此不适合作为 PEEP 滴定的指导工具。有研究显示,床旁胸部数字 X 线(DR)摄片能够很好地评价不同 PEEP 下复张肺容量;肺部超声图像与肺通气具有较好地相关性。Bouhemad 等^[33]在应用肺部超声及 P-V 曲线评价肺复张的效果研究发现,超声也能够有效评价肺复张的效果,但是 B 超不能监测肺部过度扩张,因此需要结合其他指标进行综合评价^[34],如肺顺应性和电阻抗断层成像技术(electrical impedance tomography, EIT)。EIT 是通过区域性肺部通气灌注成像来评价肺泡塌陷及

过度充气状况^[35],在 ARDS 患者进行肺复张操作及 PEEP 选择时,可实时根据 EIT 成像图像优化呼吸机设置。但 EIT 在临床应用中,还需要解决如何通过区域性肺功能成像来反映整个肺部通气功能以及进一步加强阻抗方法信号干扰的问题。

2.7 PEEP 滴定小结

当进行 PEEP 滴定时,引起氧合及呼吸力学指标改变通常在 PEEP 改变 5 min 后,而每次 PEEP 变化导致效应最大化常在 60 min 以后。当递增或递减 PEEP 时,一般要观察 5 min 以上再进行下一步操作。而 PEEP 设置方法的选择,需要根据各自医院不同条件(呼吸机品牌功能、超声、EIT 辅助设备)以及操作者对各种方法的掌握程度来决定。PEEP 设置的具体方法^[36]见表 3。

表 3 成人临床常用 PEEP 设置方法^[36]

设置方法	方法描述	评价
PEEP-FiO ₂ 表格法	根据表格法调节 PEEP, 以达到氧合目标 (PaO ₂ 55~80 mm Hg, SPO ₂ 88%~95%)。	简单易行, 根据肺可复张性选择高/低 PEEP, 但不个体化。
最佳氧合/顺应性法	PEEP 递增法肺复张后, 设置 PEEP 至 20~25 cm H ₂ O, 每 5 min 递减 2 cm H ₂ O PEEP, 测定 PaO ₂ 或肺顺应性, 确定最佳点; 之后再次肺复张滴定 PEEP 至最佳点 +2 cm H ₂ O。	结合肺复张的个体化操作, 衍生出驱动压概念; 步骤繁琐, 需要应用容控模式及镇静/肌松。
P-V 曲线法	吸气支低位拐点或呼气支呼气最大曲率点 +2 cm H ₂ O。	主流 PEEP 设置法, 需要特定呼吸机测定。
应力指数法	恒流容控模式下, 使 SI=1 的 PEEP。	操作简单, 但需要特定软件模块。
食道测压法	通过食道压间接评估胸内压, 调节 PEEP 使呼气末 PEEP>食道压; 限制吸气末跨肺压 <25 cm H ₂ O。	对胸壁顺应性低特定人群效果好, 需要食道测压管及特殊型号呼吸机。
影像学法	通过 CT、胸部数字 X 线、超声或电阻抗断层成像等影像技术评估肺复张效果。	CT 为肺复张金标准, B 超和电阻抗断层成像术无创、快捷。

3 小结

ARDS 肺复张及 PEEP 设定理论上是改善氧合实施肺保护性通气策略的重要组成部分,但目前对肺复张及 PEEP 设定方法均没有定论。结合目前循证学资料,肺复张及 PEEP 设定在 ARDS 患者中的应用步骤为:(1)在进行肺复张前先进行肺可复张性评估,对于具有肺可复张性患者进行肺复张;(2)PEEP 递增法进行肺复张优于持续充气法肺复张;(3)肺复张后设定合适 PEEP 保持肺开放。2015 年儿童 ARDS 指南建议,对于儿童 ARDS,应用 PEEP 递增法谨慎进行肺复张,之后根据 ARDS 严重程度滴定合适 PEEP 改善氧合,儿童多参照成人 PEEP-FiO₂ 表格法进行 PEEP 滴定。

随着对 ARDS 病理生理认识的加深及呼吸力学、影像学技术不断进步,“最优 PEEP”一定可以找到。

[参 考 文 献]

- [1] Acute Respiratory Distress Syndrome Network; 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.
- [2] Pediatric Acute Lung Injury Consensus Conference Group. Pediatric acute respiratory distress syndrome: consensus recommendations from the Pediatric Acute Lung Injury Consensus Conference[J]. Pediatr Crit Care Med, 2015, 16(5): 428-439.
- [3] Santos CL, Samary CS, Fiorio Júnior PL, et al. Pulmonary recruitment in acute respiratory distress syndrome. What is the

- best strategy?[J]. *Rev Col Bras Cir*, 2015, 42(2): 125-129.
- [4] Santos RS, Silva PL, Pelosi P, et al. Recruitment maneuvers in acute respiratory distress syndrome: the safe way is the best way[J]. *World J Crit Care Med*, 2015, 4(4): 278-286.
- [5] Gattinoni L, Caironi P, Cressoni M, et al. Lung recruitment in patients with the acute respiratory distress syndrome[J]. *N Engl J Med*, 2006, 354(17): 1775-1786.
- [6] Chiumello D, Cressoni M, Carlesso E, et al. Bedside selection of positive end-expiratory pressure in mild, moderate, and severe acute respiratory distress syndrome[J]. *Crit Care Med*, 2014, 42(2): 252-264.
- [7] Grasso S, Stripoli T, Sacchi M, et al. Inhomogeneity of lung parenchyma during the open lung strategy: a computed tomography scan study[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2009, 180(5): 415-423.
- [8] 中华医学会呼吸病学分会呼吸危重症医学学组. 急性呼吸窘迫综合征患者机械通气指南(试行)[J]. *中华医学杂志*, 2016, 96(6): 404-424.
- [9] Meade MO, Cook DJ, Griffith LE, et al. A study of the physiologic responses to a lung recruitment maneuver in acute lung injury and acute respiratory distress syndrome[J]. *Respir Care*, 2008, 53(11): 1441-1449.
- [10] Brower RG, Morris A, MacIntyre N, et al. Effects of recruitment maneuvers in patients with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome ventilated with high positive end-expiratory pressure[J]. *Crit Care Med*, 2003, 31(11): 2592-2597.
- [11] Marini JJ. Recruitment by sustained inflation: time for a change[J]. *Intensive Care Med*, 2011, 37(10): 1572-1574.
- [12] Constantin JM, Godet T, Jabaudon M, et al. Recruitment maneuvers in acute respiratory distress syndrome[J]. *Ann Transl Med*, 2017, 5(14): 290.
- [13] Keenan JC, Formenti P, Marini JJ. Lung recruitment in acute respiratory distress syndrome: what is the best strategy?[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2014, 20(1): 63-68.
- [14] Cruces P, Donoso A, Valenzuela J, et al. Respiratory and hemodynamic effects of a stepwise lung recruitment maneuver in pediatric ARDS: a feasibility study[J]. *Pediatr Pulmonol*, 2013, 48(11): 1135-1143.
- [15] Rimensberger PC, Cheifetz IM; Pediatric Acute Lung Injury Consensus Conference Group. Ventilatory support in children with pediatric acute respiratory distress syndrome: proceedings from the Pediatric Acute Lung Injury Consensus Conference[J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2015, 16(5 Suppl 1): S51-S60.
- [16] Briel M, Meade M, Mercat A, et al. Higher vs lower positive end-expiratory pressure in patients with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome: systematic review and meta-analysis[J]. *JAMA*, 2010, 303(9): 865-873.
- [17] Gattinoni L, Carlesso E, Cressoni M. Selecting the 'right' positive end-expiratory pressure level[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2015, 21(1): 50-57.
- [18] Brower RG, Lanken PN, MacIntyre N, et al. Higher versus lower positive end-expiratory pressures in patients with the acute respiratory distress syndrome[J]. *N Engl J Med*, 2004, 351(4): 327-336.
- [19] Suter PM, Fairley B, Isenberg MD. Optimum end-expiratory airway pressure in patients with acute pulmonary failure[J]. *N Engl J Med*, 1975, 292(6): 284-289.
- [20] Murray IP, Modell JH, Gallagher TJ, et al. Titration of PEEP by the arterial minus end-tidal carbon dioxide gradient[J]. *Chest*, 1984, 85(1): 100-104.
- [21] Bian W, Chen W, Chao Y, et al. Application of dead space fraction to titrate optimal positive end-expiratory pressure in an ARDS swine model[J]. *Exp Ther Med*, 2017, 13(4): 1572-1577.
- [22] Amato MB, Meade MO, Slutsky AS, et al. Driving pressure and survival in the acute respiratory distress syndrome[J]. *N Engl J Med*, 2015, 372(8): 747-755.
- [23] Blanch L, López-Aguilar J, Villagrà A. Bedside evaluation of pressure-volume curves in patients with acute respiratory distress syndrome[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2007, 13(3): 332-337.
- [24] Amato MB, Barbas CS, Medeiros DM, et al. Effect of a protective-ventilation strategy on mortality in the acute respiratory distress syndrome[J]. *N Engl J Med*, 1998, 338(6): 347-354.
- [25] Albaiceta GM, Blanch L, Lucangelo U. Static pressure-volume curves of the respiratory system: were they just a passing fad?[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2008, 14(1): 80-86.
- [26] Hess DR. Respiratory mechanics in mechanically ventilated patients[J]. *Respir Care*, 2014, 59(11): 1773-1794.
- [27] Pan C, Chen L, Zhang YH, et al. Physiological correlation of airway pressure and transpulmonary pressure stress index on respiratory mechanics in acute respiratory failure[J]. *Chin Med J(Engl)*, 2016, 129(14): 1652-1657.
- [28] Grasso S, Stripoli T, De Michele M, et al. ARDSnet ventilatory protocol and alveolar hyperinflation: role of positive end-expiratory pressure[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2007, 176(8): 761-767.
- [29] Huang Y, Yang Y, Chen Q, et al. Pulmonary acute respiratory distress syndrome: positive end-expiratory pressure titration needs stress index[J]. *J Surg Res*, 2013, 185(1): 347-352.
- [30] Mauri T, Yoshida T, Bellani G, et al. Esophageal and transpulmonary pressure in the clinical setting: meaning, usefulness and perspectives[J]. *Intensive Care Med*, 2016, 42(9): 1360-1373.
- [31] Talmor D, Sarge T, Malhotra A, et al. Mechanical ventilation guided by esophageal pressure in acute lung injury[J]. *N Engl J Med*, 2008, 359(20): 2095-2104.
- [32] Kallet RH. Should PEEP titration be based on chest mechanics in patients with ARDS?[J]. *Respir Care*, 2016, 61(6): 876-890.
- [33] Bouhemad B, Brisson H, Le-Guen M, et al. Bedside ultrasound assessment of positive end-expiratory pressure-induced lung recruitment[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2011, 183(3): 341-347.
- [34] Wang X, Ding X, Zhang H, et al. Lung ultrasound can be used to predict the potential of prone positioning and assess prognosis in patients with acute respiratory distress syndrome[J]. *Crit Care*, 2016, 20(1): 385.
- [35] Frerichs I, Amato MBP, 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.
- [36] Hess DR. Recruitment maneuvers and PEEP titration[J]. *Respir Care*, 2015, 60(11): 1688-1704.

(本文编辑: 邓芳明)