

· 综述 ·

肺开放通气策略在患儿围术期肺不张的应用进展

郝伟 录亚鹏 张荣智 张琰 王迎斌

【摘要】 随着患儿手术量的增加,全麻机械通气中呼吸管理成为了重点。患儿呼吸系统发育不完善,传统机械通气设置易发生容积伤、气压伤等呼吸机相关肺损伤和术后肺部并发症,不利于患儿预后。应用小潮气量进行机械通气,在降低肺损伤及术后肺部并发症的同时会引起肺不张的发生。肺开放通气策略的实施在改善肺顺应性和氧合功能的同时,亦能降低术后肺不张和术后肺部并发症的发生率。然而,患儿中应用此策略尚无统一共识,本文对近年来涉及肺开放通气策略在患儿中的应用现状做一综述,为患儿围术期实施此策略提供参考。

【关键词】 肺开放;肺复张;呼气末正压;儿童

Application progress of open lung ventilation strategy in children with perioperative atelectasis

HAO Wei, LU Yapeng, ZHANG Rongzhi, ZHANG Yan, WANG Yingbing. Department of Anesthesiology, the Second Hospital of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Corresponding author: WANG Yingbing, Email: wangyingbin6@163.com

【Abstract】 With the increase in the number of operations in children, respiratory management during general anesthesia and mechanical ventilation has become a focus. The respiratory system development of children is not perfect, and traditional mechanical ventilation setting is prone to volutrauma, barotrauma and other ventilator-related lung injuries and postoperative pulmonary complications, which is not conducive to the prognosis of children. Mechanical ventilation with a small tidal volume can reduce lung injury and postoperative pulmonary complications while causing atelectasis. The implementation of open lung ventilation strategy can improve lung compliance and oxygenation function while reducing the incidence of postoperative atelectasis and pulmonary complications. However, there is no consensus on the application of this strategy in children. This article reviews the current status of the application of open lung ventilation strategy in children in recent years, and provides a reference for the implementation of this strategy in the children perioperative period.

【Key words】 Open lung; Lung recruitment maneuver; Positive end expiratory pressure; Child

患儿作为特殊群体,因具有功能残气量低、闭合容量和耗氧量高等呼吸系统特征,故在全麻后易发生呼吸系统相关并发症,包括低氧血症和肺不张等^[1],从而影响患儿的预后,肺不张是引起术中、术后低氧血症以及术后肺部并发症(postoperative pulmonary complications, PPCs)的重要因素之一^[2]。因此预防与治疗肺不张进而降低 PPCs 是目前所关注的焦点。尤其是 Lachmann^[3]提出的肺开放通气策略(open lung ventilation strategy, OLVS)在改善患儿肺顺应性和氧合功能,降低肺不张及术后 PPCs 的发生率方面起到关键作用^[4]。然而对患儿在围

术期实施 OLVS 缺乏统一共识,本文将结合现有研究,探讨 OLVS 在患儿临床应用中的最新进展,为实施此策略提供参考。

患儿呼吸系统解剖与肺不张

与成人不同,患儿因呼吸系统发育不成熟,其易发生呼吸系统相关并发症,且年龄越小呼吸系统相关并发症发生率越高。其呼吸系统发育不成熟表现在:第一,患儿肺泡数量和大小随年龄的增长不断增多,约在 8 岁后接近成人水平;第二,婴幼儿气道不能被周围组织完全支撑,且肋骨也不能完全支撑肺脏,故在呼吸周期内易发生功能性气道关闭;第三,婴儿无效腔通气比例与成人相似,但其耗氧量是成人的 2~3 倍;第四,婴幼儿呼吸肌发育不完全,膈肌位置相对较高,胸腔相对狭小,胸壁顺应性和闭合容量较高且功能残气量低下。因此,任何

DOI: 10.12089/jca.2023.05.015

基金项目:兰州大学第二医院“萃英科技创新”计划(CY2019-BJ07, CY2020-BJ10);甘肃省高等学校创新基金项目(2020B-049)

作者单位:730000 兰州大学第二医院麻醉科

通信作者:王迎斌, Email: wangyingbin6@163.com

引起呼吸做功增加的因素(如气道压力升高、机械通气人机对抗等)均可导致患儿呼吸肌疲劳,易引起低氧血症和肺不张等呼吸系统并发症^[1]。

肺不张作为影响围术期患儿氧合的主要因素之一,因其高发生率被广泛关注。Acosta 等^[1]研究表明,患儿肺不张的发生率高达 68%~100%。新生儿和婴儿在机械通气过程中比成人更易发生肺不张^[5]。在围术期,多种因素相互作用共同引起肺不张的形成。全麻后肌张力丧失会引起功能残气量的降低,导致小气道关闭;其次体位变换后(如仰卧位、头低脚高位等)会促使膈肌上移,升高胸腔压力同时降低跨肺压(跨肺压=肺泡内压-胸膜腔内压),进而引起肺组织的塌陷^[6]。Zeng 等^[7]研究表明,肺不张的形成与胸膜腔压力升高、肺泡内压降低和肺泡表面活性物质受损三个因素相关,而全身麻醉、机械通气和手术干预等均会造成上述因素间的失衡,导致肺泡组织间歇或持续塌陷。此外,高 FiO_2 、患儿自身特点(如肥胖、并存呼吸系统基础疾病等)以及导致腹内压增加的因素(如气腹、腹膜炎、腹腔间室综合征)等也会引起肺不张的发生^[8]。Ji 等^[9]研究表明,与保留自主呼吸通气比较,对婴儿(<12 月)在全麻诱导期间使用呼吸气囊控制呼吸,肺不张发生率明显增高(26.9% vs 73.3%),特别是在肺重力依赖区(仰卧位时靠近背部的肺区)。

肺开放通气策略与肺不张

OLVS 具体实施步骤为:先实施肺复张(lung recruitment maneuver, LRM)策略逆转肺不张,然后给予一定的 PEEP 以维持肺泡开放、稳定肺泡单元,从而降低肺不张的发生^[5]。其中,肺复张策略与 PEEP 策略是实施 OLVS 的关键步骤,下文将重点阐述 LRM 策略、PEEP 策略与肺不张的关系。

LRM 策略 LRM 是指间歇给予一定的时间气道正压,使塌陷的肺泡重新开放。实施 LRM 策略可

明显提高肺顺应性、功能残气量及氧合指数,同时减少分流并改善通气不良区域的肺灌注^[10],从而降低术后低氧血症、肺不张和 PPCs 的发生率^[11]。Song 等^[5]利用肺超声评估全麻对患儿肺不张影响的研究表明,实施 LRM 策略患儿肺不张的发生率仅为 25%,而对照组患儿肺不张的发生率则高达 80%,表明术中实施 LRM 策略可明显降低全麻引起的肺不张发生率。此外,对于麻醉和气腹因素所导致的肺不张,实施 LRM 策略同样具有明显的改善作用^[1]。截至目前,临床常见的 LRM 策略包括手法 LRM 策略和呼吸机驱动的 LRM 策略两大类,呼吸机驱动的 LRM 策略又包括:肺活量法、PCV 法、PEEP 递增/递减法,具体实施策略详见表 1。

与呼吸机驱动的 LRM 策略比较,手法 LRM 策略因其在实施过程中存在呼吸模式的转换,使正压和肺容积短暂丧失,导致复张肺泡的重新塌陷^[16]。并且 Young 等^[16]研究也表明,实施手法 LRM 策略并不能降低围术期 PPCs 的发生率。综上所述,呼吸机驱动的 LRM 策略因其可避免手法 LRM 策略的不足而成为目前所推荐的最佳 LRM 方案^[17]。

此外,Acosta 等^[18]报道了另外一种新的 LRM 策略,即对 6 个月至 7 岁的患儿实施体位性 LRM 策略(postural lung recruitment maneuver, P-RM):保持驱动压力不变,逐级增加 PEEP 至 10 cmH_2O ,分别于左侧卧位和右侧卧位维持 90 s,之后于平卧位维持 3 min;与传统 LRM 策略比较,P-RM 策略表现出了更好的肺顺应性及更低的肺不张发生率。另外,He 等^[19]研究表明,对行心脏手术的患儿(<3 岁)实施 P-RM 策略可使其肺通气功能得到明显改善。

吸气压作为 LRM 策略的重要组成部分,其选择原则为既可以复张塌陷的肺泡,同时又不造成肺的气压伤。Park 等^[20]研究表明,吸气压 40 cmH_2O 、维持 15 s 即可使健康成人塌陷的肺组织全部开放,而 40 cmH_2O 的吸气压同样可安全用于儿童^[10,21]。而

表 1 患儿不同肺复张策略

肺复张策略	具体实施方法
肺活量法 ^[12-13]	设置 PIP 30~40 cmH_2O ,维持 5~20 s
PCV 法 ^[1,7]	PCV 模式,维持驱动压 15 cmH_2O 不变,每次增加 PEEP 5 cmH_2O (5~15 cmH_2O),每个 PEEP 下维持 3 次呼吸,直至压力达 30 cmH_2O ,持续 10 次呼吸循环即可
PEEP 递增/递减法 ^[14]	PEEP 以 5 cmH_2O 递增(5~20 cmH_2O),每个 PEEP 水平下行 5 次呼吸循环,直至 PIP 为 40 cmH_2O ,维持 10 次呼吸循环后 PEEP 逐渐以 2 cmH_2O 递减至原水平
手法肺复张 ^[5,15]	手控模式,挤压呼吸囊使 PIP 达 40 cmH_2O ,维持 10 次呼吸循环

Lee 等^[22]研究表明,在 ≤ 6 岁患儿中使塌陷肺组织完全开放所需气道压的中位数为 35 cmH₂O。因此,目前多数研究建议实施 LRM 策略时压力设置 PIP 在 30~40 cmH₂O,维持时间 5~15 s。此外,不同年龄段患儿呼吸生理特性不同的特征,故选择具体的 LRM 策略和压力时应结合患儿的实际情况综合考虑。并且,LRM 过程中因肺容积和胸内压的增加会导致血流动力学波动。Das 等^[23]研究表明 PCV 法对循环的影响明显低于肺活量法,而 PEEP 递增法比其他复张策略具有更好的血流动力学耐受性^[24],尤其是对于存在血流动力学不稳定或心肺疾患的患儿,如需实施 LRM 策略,则可选择对循环影响更小的阶梯式 LRM 策略(即 PEEP 递增/递减法),同时密切监测患儿的循环功能。

PEEP 策略 PEEP 策略作为 OLVS 的另一重要组成部分,可通过维持肺泡的开放状态、增加患者功能残气量和改善肺顺应性,进而降低肺不张的发生率,改善患儿的肺通气及氧合功能,产生肺保护作用。Wirth 等^[25]研究表明,与 ZEEP(0 PEEP)组患儿比较,全麻患儿实施 7 cmH₂O PEEP 可明显降低术后肺不张的发生率($P=0.019$)。然而,目前对于具体 PEEP 值的设置争议较大。PEEP 值过小不足以维持肺泡开放状态,无法起到肺保护作用;而 PEEP 值过大不仅会引起肺损伤,同时也可引起血流动力学不稳定^[26]。Ingaramo 等^[27]研究表明,当 PEEP 从 0 增加至 12 cmH₂O 时,患儿心脏指数的中位数下降约 $0.4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ($<10\%$) ($P<0.001$)。随着年龄的增长,患儿的呼吸系统解剖及生理会发生变化,因此,应根据各年龄段设置最佳个体化 PEEP^[28]。

最佳个体化 PEEP 指在不明显影响患儿循环功能的同时,最大程度改善患儿的通气氧合功能。Pereira 等^[29]研究表明,最佳个体化 PEEP 可通过增加肺顺应性、降低驱动压,改善患儿术后肺不张面积,提高患儿通气功能。然而,最佳个体化 PEEP 作为研究的主要焦点,目前并没有统一的设置方式,多数研究通过肺超声法、肺部电阻抗成像(electrical impedance tomography, EIT)法和驱动压(driving pressure, DP)等方法确定最佳个体化 PEEP。

(1)肺超声法。肺超声法即通过连续肺超声检查,逐级增加 PEEP 值(每次增加 2 cmH₂O),并在增加后 5 min 行肺超声评分(lung ultrasound score, LUS),当 LUS <2 分时的 PEEP 值为最佳 PEEP。Elshazly 等^[30]研究表明,肺超声导向最佳 PEEP 设

置不仅能够明显提高术后动脉氧分压,也能降低术后肺不张和术后 24 h PPCs 发生率,并且,实施过程中患者血流动力学无明显的变化。肺超声除了评价肺通气状况,还可对气胸、胸腔积液、膈肌功能等进行诊断。

(2)EIT 法。利用 EIT 描绘每个 PEEP 值下过度膨胀肺单元和塌陷肺单元的百分比曲线,两曲线交叉点上方最近的 PEEP 为最优 PEEP 值。在 ARDS 的患儿中,利用 EIT 技术确认最佳 PEEP 值为 12 或 13 cmH₂O,表明在此 PEEP 下患者机械损伤、肺萎陷和过度膨胀比最小。EIT 技术不仅能够指导 PEEP 滴定,也能实时可视化观测不同状态下患儿肺通气的变化,最大程度降低通气相关肺损伤^[31]。

(3)驱动压(driving pressure, DP)法。DP 是呼吸系统扩张的直接动力, $DP = P_{\text{plat}}(\text{平台压}) - PEEP$ 。DP 导向个体化 PEEP 设置具体实施方法为:选择容量控制通气模式,保持潮气量不变,通过调节 PEEP,当 DP 最小时为最佳 PEEP。对行腹腔镜手术的患儿(1~6 岁)实施驱动压导向最佳个体化 PEEP 设置,与固定 PEEP(5 cmH₂O)比较,明显提高患儿肺动态顺应性,降低了驱动压和术后肺不张的面积^[32]。

小 结

患儿在机械通气中易发生呼吸机相关肺损伤及术后肺部并发症,如肺不张等。OLVS 具有肺保护作用,可以改善通气/血流比,降低术后肺不张及 PPCs 的发生率。但是,患儿年龄范围跨度较大,且其呼吸系统解剖及生理与成人明显不同,因此应根据患儿不同年龄段的生理特点和临床中实施情况来选择最佳的 OLVS。然而,在患儿中此类研究较少,需要更多的研究为临床应用此技术提供依据。

参 考 文 献

- [1] Acosta CM, Sara T, Carpinella M, et al. Lung recruitment prevents collapse during laparoscopy in children: a randomised controlled trial. *Eur J Anaesthesiol*, 2018, 35(8): 573-580.
- [2] Ladha K, Vidal Melo MF, McLean DJ, et al. Intraoperative protective mechanical ventilation and risk of postoperative respiratory complications: hospital based registry study. *BMJ*, 2015, 351: h3646.
- [3] Lachmann B. Open up the lung and keep the lung open. *Intensive Care Med*, 1992, 18(6): 319-321.
- [4] Zhu C, Zhang S, Dong J, et al. Effects of positive end-expiratory pressure/recruitment manoeuvres compared with zero end-expira-

- tory pressure on atelectasis in children: a randomised clinical trial. *Eur J Anaesthesiol*, 2021, 38(10): 1026-1033.
- [5] Song IK, Kim EH, Lee JH, et al. Effects of an alveolar recruitment manoeuvre guided by lung ultrasound on anaesthesia-induced atelectasis in infants: a randomised, controlled trial. *Anaesthesia*, 2017, 72(2): 214-222.
 - [6] Bruins S, Sommerfield D, Powers N, et al. Atelectasis and lung recruitment in pediatric anesthesia: an educational review. *Paediatr Anaesth*, 2022, 32(2): 321-329.
 - [7] Zeng C, Lagier D, Lee JW, et al. Perioperative pulmonary atelectasis: part I. Biology and mechanisms. *Anesthesiology*, 2022, 136(1): 181-205.
 - [8] Cho S, Oh HW, Choi MH, et al. Effects of intraoperative ventilation strategy on perioperative atelectasis assessed by lung ultrasonography in patients undergoing open abdominal surgery: a prospective randomized controlled study. *J Korean Med Sci*, 2020, 35(39): e327.
 - [9] Ji SH, Jang HS, Jang YE, et al. Effect of spontaneous breathing on atelectasis during induction of general anaesthesia in infants: a prospective randomised controlled trial. *Eur J Anaesthesiol*, 2020, 37(12): 1150-1156.
 - [10] Tusman G, Böhm SH, Tempira A, et al. Effects of recruitment maneuver on atelectasis in anesthetized children. *Anesthesiology*, 2003, 98(1): 14-22.
 - [11] Severgnini P, Selmo G, Lanza C, et al. Protective mechanical ventilation during general anesthesia for open abdominal surgery improves postoperative pulmonary function. *Anesthesiology*, 2013, 118(6): 1307-1321.
 - [12] Jang YE, Ji SH, Kim EH, et al. Effect of regular alveolar recruitment on intraoperative atelectasis in paediatric patients ventilated in the prone position: a randomised controlled trial. *Br J Anaesth*, 2020, 124(5): 648-655.
 - [13] Mansfield SA, Dykes M, Adler B, et al. Improving quality of chest computed tomography for evaluation of pediatric malignancies. *Pediatr Qual Saf*, 2019, 4(3): e166.
 - [14] Tusman G, Acosta CM, Nicola M, et al. Real-time images of tidal recruitment using lung ultrasound. *Crit Ultrasound J*, 2015, 7(1): 19.
 - [15] Newman B, Krane EJ, Gawande R, et al. Chest CT in children: anesthesia and atelectasis. *Pediatr Radiol*, 2014, 44(2): 164-172.
 - [16] Young CC, Harris EM, Vacchiano C, et al. Lung-protective ventilation for the surgical patient: international expert panel-based consensus recommendations. *Br J Anaesth*, 2019, 123(6): 898-913.
 - [17] Ball L, Hemmes S, Serpa Neto A, et al. Intraoperative ventilation settings and their associations with postoperative pulmonary complications in obese patients. *Br J Anaesth*, 2018, 121(4): 899-908.
 - [18] Acosta CM, Volpicelli G, Rudzik N, et al. Feasibility of postural lung recruitment maneuver in children: a randomized, controlled study. *Ultrasound J*, 2020, 12(1): 34.
 - [19] He P, Wu C, Yang Y, et al. Effectiveness of postural lung recruitment on postoperative atelectasis assessed by lung ultrasound in children undergoing lateral thoracotomy cardiac surgery with cardiopulmonary bypass. *Pediatr Pulmonol*, 2021, 56(6): 1724-1732.
 - [20] Park M, Ahn HJ, Kim JA, et al. Driving pressure during thoracic surgery: a randomized clinical trial. *Anesthesiology*, 2019, 130(3): 385-393.
 - [21] Rothen HU, Sporre B, Engberg G, et al. Influence of gas composition on recurrence of atelectasis after a reexpansion maneuver during general anesthesia. *Anesthesiology*, 1995, 82(4): 832-842.
 - [22] Lee JH, Choi S, Ji SH, et al. Effect of an ultrasound-guided lung recruitment manoeuvre on postoperative atelectasis in children: a randomised controlled trial. *Eur J Anaesthesiol*, 2020, 37(8): 719-727.
 - [23] Das A, Haque M, Chikhani M, et al. Hemodynamic effects of lung recruitment maneuvers in acute respiratory distress syndrome. *BMC Pulm Med*, 2017, 17(1): 34.
 - [24] Odenstedt H, Lindgren S, Olegård C, et al. Slow moderate pressure recruitment maneuver minimizes negative circulatory and lung mechanic side effects: evaluation of recruitment maneuvers using electric impedance tomography. *Intensive Care Med*, 2005, 31(12): 1706-1714.
 - [25] Wirth S, Artner L, Broß T, et al. Intratidal recruitment/derecruitment persists at low and moderate positive end-expiratory pressure in paediatric patients. *Respir Physiol Neurobiol*, 2016, 234: 9-13.
 - [26] Mercat A, Richard JC, Vielle B, et al. Positive end-expiratory pressure setting in adults with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome: a randomized controlled trial. *JAMA*, 2008, 299(6): 646-655.
 - [27] Ingaramo OA, Ngo T, Khemani RG, et al. Impact of positive end-expiratory pressure on cardiac index measured by ultrasound cardiac output monitor. *Pediatr Crit Care Med*, 2014, 15(1): 15-20.
 - [28] Lee JH, Ji SH, Lee HC, et al. Evaluation of the intratidal compliance profile at different PEEP levels in children with healthy lungs: a prospective, crossover study. *Br J Anaesth*, 2020, 125(5): 818-825.
 - [29] 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.
 - [30] Elshazly M, Khair T, Bassem M, et al. The use of intraoperative bedside lung ultrasound in optimizing positive end expiratory pressure in obese patients undergoing laparoscopic bariatric surgeries. *Surg Obes Relat Dis*, 2021, 17(2): 372-378.
 - [31] Rosemeier I, Reiter K, Obermeier V, et al. Mechanical ventilation guided by electrical impedance tomography in children with acute lung injury. *Crit Care Explor*, 2019, 1(7): e0020.
 - [32] 郝伟, 张琰, 录亚鹏, 等. 驱动压导向个体化呼气末正压对小儿腹腔镜手术中肺保护以及术后肺不张的影响研究. *临床小儿外科杂志*, 2022, 21(5): 468-473.

(收稿日期: 2022-05-14)