

• 临床经验 •

体外膜肺氧合过程中离心泵失功的应急处理

方可 汪君 孙瑞祥 张鹏 徐前程 李阳 江海娇 姜小敢

皖南医学院第一附属医院(弋矶山医院),重症医学科/安徽省危重症呼吸疾病临床医学研究中心,安徽芜湖 241000

通信作者:姜小敢, Email: yjsicu@126.com

【摘要】 目的 总结体外膜肺氧合(ECMO)治疗过程中离心泵失功导致血流量快速下降的应急处理流程与相关思考。**方法** 分析皖南医学院第一附属医院重症医学科 2021 年 9 月 25 日收治的 1 例重症支原体肺炎、重症病毒性肺炎、急性呼吸窘迫综合征(ARDS)的 14 岁男性患儿 ECMO 治疗过程。**结果** 患儿在有创机械通气下氧合难以维持,肺实变进展严重,经评估后实施静脉-静脉 ECMO(VV-ECMO),氧合得到改善。在 VV-ECMO 运行 120 h 后,突发血流量下降,转速 3 822 r/min,流量仅 0.2 L/min,提高转速后流量无变化。而此前 ECMO 转速 3 530 r/min,流量可达 3.4 L/min,且持续稳定。经快速排查后确定是离心泵失功,随后成功置换 ECMO,置换后流量满意。**结论** 目前大多 ECMO 中心并未对泵前后压力进行常规监测,临床对离心泵失功的判断缺乏可视化和量化的技术及指标,同时对其处理也缺乏相应的临床经验。本文总结该病例 ECMO 离心泵失功的排查及处理流程以提供参考及借鉴。

【关键词】 体外膜肺氧合; 泵失功; 低血流量; 机械并发症**基金项目:** 安徽省医疗卫生重点专科建设项目(2021-273)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20220126-00100

Emergency treatment of centrifugal pump dysfunction in extracorporeal membrane oxygenation

Fang Ke, Wang Jun, Sun Ruixiang, Zhang Peng, Xu Qiancheng, Li Yang, Jiang Haijiao, Jiang Xiaogan

Department of Critical Care Medicine, the First Affiliated Hospital of Wannan Medical College (Yijishan Hospital), Anhui Provincial Clinical Research Center for Critical Respiratory Disease, Wuhu 241000, Anhui, China

Corresponding author: Jiang Xiaogan, Email: yjsicu@126.com

【Abstract】 Objective To summarize the treatment process of rapid decrease in blood flow due to centrifugal pump dysfunction during extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) and its related thinking. **Methods** On September 25, 2021, the ECMO treatment of a 14-year-old boy with severe mycoplasma pneumonia, severe viral pneumonia and acute respiratory distress syndrome (ARDS) admitted to the department of critical care medicine of the First Affiliated Hospital of Wannan Medical College was analyzed. **Results** Oxygenation of the child was difficult to maintain under invasive mechanical ventilation, and lung consolidation progressed seriously. After evaluation, venous-venous ECMO (VV-ECMO) was implemented, then oxygenation was improved. In the 120th hour after VV-ECMO establishment, the blood flow sudden decreased, the speed was 3 822 r/min, while the flow was only 0.2 L/min, more over there was no change in the flow when the speed was increased. Before that, the ECMO speed was 3 530 r/min, and the flow was up to 3.4 L/min and stable. After rapid screening, it was determined that the centrifugal pump was dysfunction. ECMO was successfully replaced and the flow was satisfactory. **Conclusions** At present, most ECMO centers do not routinely monitor the pressure before and after the pump. There is a lack of visual and quantitative techniques or indicators to judge the pump's function, and there is also a lack of corresponding clinical experience in treatment. This paper summarizes the investigation and treatment process of ECMO pump dysfunction of this case to provide reference.

【Key words】 Extracorporeal membrane oxygenation; Centrifugal pump dysfunction; Low blood flow; Mechanical complications

Fund program: Key Medical and Health Specialty Construction Project of Anhui Province (2021-273)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20220126-00100

体外膜肺氧合(extracorporeal membrane oxygenation, ECMO)是一项高级的心肺支持技术,挽救了很多常规支持无效的心肺功能衰竭患者,并且近年来得到了越来越广泛的应用^[1]。对于重症急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)患者,ECMO 可给予较长时间的呼吸功能支持,为肺部原发病的诊治赢得时机、创造条件^[2]。然而,在 ECMO 治疗过程中,往往会发生难以避免的机械性并发症,主要包括急性氧合器血栓形成(acute oxygenator thrombosis, AOT)、氧合器功能障碍、泵头内血栓形成、环路

崩裂、环路进气、插管脱出等,大多需要紧急处理,甚至更换 ECMO 系统^[3-7]。Lubnow 等^[5]的一项回顾性分析研究显示,需要紧急更换 ECMO 系统的机械并发症发生率为 14% (37/265); Kim 等^[6]一项回顾性分析研究显示,所有危及生命的 ECMO 相关机械并发症发生率为 4.0% (22/549),而这些机械并发症大多表现为血流量快速下降或氧合指标下降。值得注意的是,ECMO 治疗过程中血流量的快速下降除与上述机械性因素有关以外,还与容量严重不足、心脏压塞、张力性气胸、插管内血栓形成等病理性因素有关。除此之外,

当离心泵失去泵血功能,即泵失功,也会导致 ECMO 血流量快速下降,但这是罕见的。本文总结 1 例离心泵失功致 ECMO 血流量快速下降的应急处理流程与相关思考,现报告如下。

1 病例介绍

患儿男性,14 岁,因胸闷、胸痛、高热 1 周,就诊于皖南医学院第一附属医院(弋矶山医院)儿科,初始诊断为社区获得性肺炎,无创呼吸机正压通气下[呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP) 10 cmH₂O (1 cmH₂O ≈ 0.098 kPa),吸入氧浓度(fraction of inspired oxygen, FiO₂) 0.60],经皮血氧饱和度(pulse oxygen saturation, SpO₂)维持在 0.87 左右,氧合指数(PaO₂/FiO₂) 92 mmHg (1 mmHg ≈ 0.133 kPa)。随后在支气管镜下行肺泡灌洗术,明确诊断为重症支原体肺炎、重症病毒性肺炎(冠状病毒 1 型、鼻病毒 A 型)、ARDS,此时在纯氧通气下,血气分析示:动脉血氧分压(arterial partial pressure of oxygen, PaO₂) 42.1 mmHg,动脉血氧饱和度(arterial oxygen saturation, SaO₂) 0.71,呼吸频率(respiratory rate, RR) 45 次/min。转入重症监护病房(intensive care unit, ICU)行气管插管机械通气[PEEP 12 cmH₂O, FiO₂ 0.80,潮气量(tidal volume, VT) 210 mL],肺炎进展严重,单纯机械通气下氧合难以维持,此时血气分析示:PaO₂ 47.8 mmHg, SaO₂ 0.77, PaO₂/FiO₂ 60 mmHg,符合静脉-静脉 ECMO(veno-veno ECMO, VV-ECMO)的指征,家属知情同意后行 VV-ECMO。穿刺部位为股静脉(引血)-颈内静脉(回血),插管型号选择股静脉导管 21 Fr(深度 42 cm),颈内静脉 17 Fr(深度 13 cm),初始转速 3 565 r/min,血流量 4.2 L/min,气流速 4.0 L/min, FiO₂ 0.60;机械通气设置:PEEP 12 cmH₂O, FiO₂ 0.60, VT 250 mL。ECMO 运行后血气分析示:PaO₂ 72.5 mmHg, SaO₂ 0.96, PaO₂/FiO₂ 121 mmHg,氧合得到改善。在 ECMO 运行 120 h 后,突发血流量下降,转速 3 822 r/min,流量仅有 0.2 L/min,提高转速后流量无变化。而在此之前,ECMO 转速 3 530 r/min,流量可达 3.4 L/min,且持续稳定。迅速检查 ECMO 管道,引血管道,并未发生抖动,管路无扭折、脱出,此时 ECMO 已经丧失呼吸支持的作用,立即提高机械通气支持水平,设置 PEEP 14 cmH₂O, FiO₂ 1.0, VT 250 mL。随即开始排查低血流量的原因并处理。

2 处理流程

2.1 排除容量严重不足:考虑患儿行连续性肾脏替代治疗(continuous renal replacement treatment, CRRT)持续脱水,ECMO 的低血流量可能与容量严重不足有关。但泵前引血管道并未发生抖动,超声探查剑突下下腔静脉(inferior vena cava, IVC)切面,ECMO 股静脉引血管管前端几乎完全漂浮在 IVC 内,因此否定了容量不足导致低血流量的可能。

2.2 排除心脏压塞、张力性气胸、插管内血栓形成:心脏超声显示,心脏运动良好,心包腔未见异常;紧急床旁胸部 X 线片显示,患者无气胸。钳闭动静脉端近插管处,开放插管上的侧孔三通,有血液快速流出且注射器抽吸通畅,故排除插管内血栓形成的可能。

2.3 排除驱动器故障:紧急使用手摇泵桥接驱动器,达相应

转速后患者氧合无明显变化,但手摇泵无法观察到流量数值,为加强证明,我们用另一台驱动器桥接原驱动器,仍显示极低流量,故排除驱动器故障的可能。

2.4 排除离心泵头失稳:离心泵头处未出现明显异常杂音;停泵,钳毕泵前泵后管道,取下泵头并重新安装后恢复正常运行,流量仍然极低,故排除离心泵头失稳的可能。

2.5 排除泵头内血栓形成:使用手电灯照射泵头,目视未见泵头内血栓形成;泵头运转时无异常噪音及异常振动;泵头内颜色较深的静脉血对血栓的观察有一定影响,在桥段位置阻断环路,经靠近泵头的三通阀灌注约 100 mL 乳酸林格液冲洗泵头,未见泵头内血栓形成,随即关闭三通阀,打开桥段阻断钳(见图 1A);此外患儿也未发生溶血倾向(血红蛋白尿),故排除泵头内血栓形成的可能。

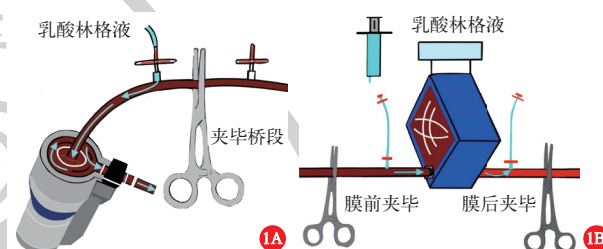
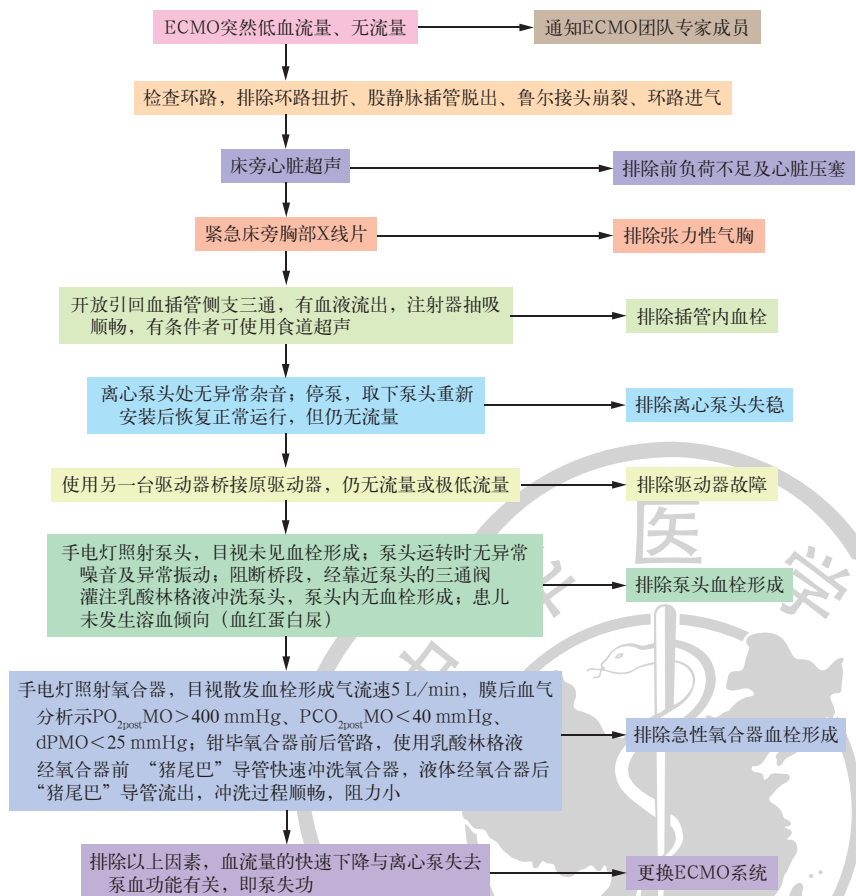


图 1 体外膜肺氧合(ECMO)泵头冲洗(A)和膜肺冲洗(B)示意图

2.6 排除 AOT:使用手电灯照射氧合器,目视有少量散在血栓形成未凝集成块;测氧合器膜后血气分析示膜后血氧分压(partial pressure of post-MO O₂, PO_{2post}MO) > 400 mmHg、膜后血二氧化碳分压(partial pressure of post-MO CO₂, PCO_{2post}MO) < 40 mmHg、氧合器压力下降(drop pressure across the MO, dPMO) < 25 mmHg;而 dPMO 在血流量较低时对 AOT 的判断价值有限。因此我们阻断氧合器前后管路,用 250 mL 乳酸林格液通过 60 mL 注射器经氧合器前“猪尾巴”导管快速冲洗氧合器,液体经氧合器后“猪尾巴”导管流出(图 1B),冲洗过程顺畅,阻力小,故排除 AOT 的可能。经过一系列的快速排查,最终确定是离心泵头泵血功能障碍导致的低血流量,即离心泵失功。随后紧急启动 ECMO 系统更换应急预案并顺利完成置换,处理流程见图 2。在此过程中,SpO₂ 水平维持在 0.88 ~ 0.92,循环指标未发生较大波动。ECMO 系统更换后,转速 3 460 r/min,血流量满意,可达 4.6 L/min,氧合改善,逐步下调 FiO₂。

3 讨论

临床上发生 ECMO 血流量突然下降最常见的原因是低血容量,还包括心脏压塞、张力性气胸等^[7],床旁超声以及床旁胸部 X 线片即可明确;有文献报道因插管内血栓导致 ECMO 血流量的下降^[8-9],但较少见,可通过超声或经食道超声协助诊断。我们通过钳闭近插管端导管,开放插管上的侧孔三通,观察是否有血液流出并使用注射器抽吸判断体内导管是否通畅的办法比较简单。剧烈的碰撞或晃动可能会使离心泵头与泵底座磁场失去耦合,导致离心泵失稳,往往可在泵头处听见明显的异常杂音,停泵重新安装泵头并恢复正



注: ECMO 为体外膜肺氧合, $PO_{2\text{postMO}}$ 为膜后血氧分压, $PCO_{2\text{postMO}}$ 为膜后血二氧化碳分压, dPMO 为氧合器压力下降; 1 mmHg $\approx$ 0.133 kPa

图2 排查 ECMO 低流量原因及处理流程图

常运行即可。因离心泵失功导致流量下降的报道是比较罕见的, 更多的原因仍然是 AOT 和泵头内血栓形成。

3.1 AOT: 即使有肝素抗凝, 氧合器血凝块形成也是 ECMO 治疗中的常见现象, 国内报道其发生率为 6.2%^[10]。Dornia 等^[11]通过对氧合器进行多层计算机断层扫描发现, 氧合器血凝块基本上多形成于血流入口位置。如果血凝块的直径在 1~5 mm, 一般不需要更换氧合器。而 AOT 会导致膜气体交换功能障碍及血流阻力增大。临床上尚无成熟的技术可以对 AOT 进行直接可视化及量化评估, 一般通过目视检查、气体交换性能、血流阻力、凝血参数和纤溶参数 5 个方面进行判断。有研究表明, 高三酰甘油血症也可造成 ECMO 氧合器功能障碍, 需要与 AOT 进行鉴别^[12-13]。

3.1.1 目视检查: 临床上在 ECMO 治疗过程中观察氧合器血凝块形成有助于指导抗凝, 但对于急性形成的血栓, 显著性会比较低。

3.1.2 气体交换性能评估: 分析氧合器前后的血气, 如果气流速不断增加 (>10 L/min), 而 $PO_{2\text{postMO}} < 200$ mmHg 或降低 $>50\%$ 、 $PCO_{2\text{postMO}} > 40$ mmHg、氧合器前后二氧化碳 (CO_2) 清除 ($PCO_{2\text{preMO}} - PCO_{2\text{postMO}} < 10$ mmHg), 则提示氧合器气体交换功能恶化^[5, 14], 这可能与膜表面血栓的沉积有关。

3.1.3 氧合器阻力测量: 判断 AOT 的另一个标准是氧合器

血流阻力的增加, 体现在 dPMO 的快速增高。Lehle 等^[15]对不同品牌的氧合器进行对比研究发现, 只有一些使用 MAQUET 系统的患者 (3%~8%) 在 1 d 内 dPMO 异常增高并且紧急更换了氧合器, 他们建议 MAQUET 的 dPMO 目标值应维持在 6~34 mmHg。当 ECMO 血流速大致在 3 L/min 时, 若 dPMO 超过 70 mmHg, 则需要紧急更换氧合器或 ECMO 系统^[16]。ECMO 血流量的变化也会对膜肺血流阻力产生影响, 为了校正血流量的变化, dPMO 与 ECMO 血流量的比值 (dPMO/BFR) 更能直接反映膜肺血流阻力^[9]。另外, 在排除前负荷等影响因素后, 为了达到预期的血流量而不断提高泵的转速可以代替 dPMO。但在本案例中, ECMO 血流量下降是快速的, dPMO 意义较小, 所以冲洗膜肺也是一种判断膜肺阻力大小的方法, 但存在一定的主观性。

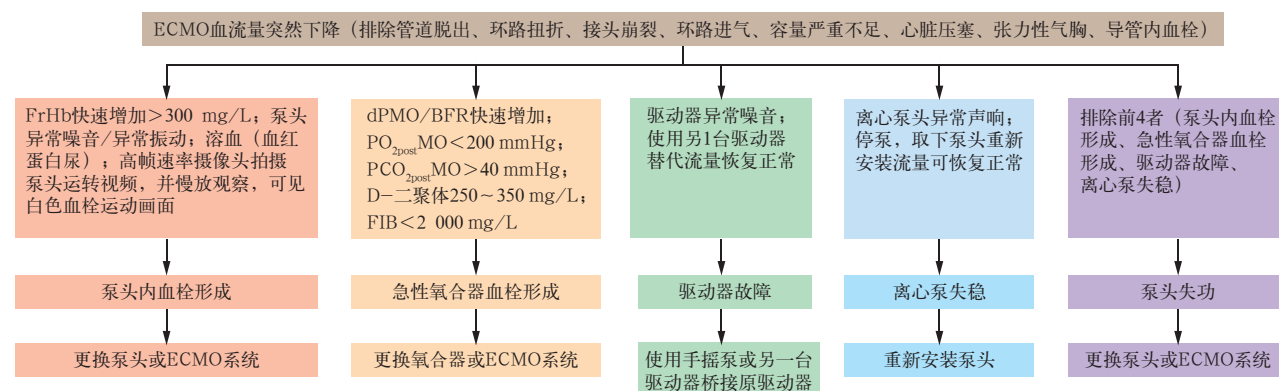
3.1.4 凝血参数及纤溶参数: 在 ECMO 治疗中, 如果出现 D-二聚体水平持续升高 (从 <100 增至 250~350 mg/L)、纤维蛋白原 (fibrinogen, FIB) 降低 (<2000 mg/L), 而无其他病理因素能够解释时, 可预测氧合器进行性血栓形成^[5, 17]。

3.2 泵头内血栓形成: 泵头是整个 ECMO 环路中的高流量区域, 此处形成的血栓往往不积聚红细胞, 所以泵头内血栓通常是白色的血小板或纤维蛋白血栓。泵头内血栓形成可从以下几个方面判断: 听泵头运转声音、目视检查、监测游离血红蛋白 (free hemoglobin, FrHb) 和溶血征象、冲洗泵头。

3.2.1 目视检查及声音异常: 泵头出现异常噪音并伴明显振动感, 提示有泵头内血栓形成的可能。通过手电灯照射泵头目视观察的效果差。Diehl 等^[18]利用高帧速率摄像头拍摄泵头血液转动的视频并将其慢放, 可以清晰地捕捉到泵头内血栓的运动画面, 这种方法在临床上可以实践。

3.2.2 FrHb 水平: ECMO 系统血栓、负压及泵速过快等因素都会引起红细胞破坏、FrHb 增加, 可导致溶血^[19]。在 Lubnow 等^[5]的报道中, 13 例泵头内血栓形成患者在紧急启动 ECMO 系统更换前, FrHb 水平较前显著升高 4~15 倍, 而在更换 ECMO 系统之后, FrHb 水平下降 4~18 倍, ECMO 支持时间相当的未形成泵头内血栓形成的患者 FrHb 则始终处于较低且平稳的水平 (<100 mg/L), 这说明检测 FrHb 水平对临床判断泵头内血栓形成是有意义的。

3.2.3 冲洗泵头: 如果高度怀疑泵头内血栓形成, 可以阻断桥段, 通过泵前三通阀连接生理盐水或乳酸林格液冲洗泵头中的血液, 但冲洗液体无需太多, 以避免前负荷过大。因泵



注: ECMO 为体外膜肺氧合, FrHb 为游离血红蛋白, dPMO 为氧合器压力下降, BFR 为血流速, dPMO/BFR 为氧合器压力下降与血流速比值, PO_{2post} -MO 为膜后血氧分压, PCO_{2post} -MO 为膜后血二氧化碳分压, FIB 为纤维蛋白原; 1 mmHg $\approx$ 0.133 kPa

图 3 ECMO 无流量或流量下降的鉴别及处理流程图

前的负压效应,要警惕气体进入循环管道,此操作需由高年资 ECMO 专科护士完成。

排除管道脱出、环路扭折、接头崩裂、环路进气、容量严重不足、心脏压塞、张力性气胸等因素后,在 ECMO 治疗过程中,我们对氧合器、离心泵头及驱动器故障所导致的血流量快速下降作出鉴别并进行相应的处理流程总结,见图 3。

使用 PLS 套包的 ECMO 中心,不管是择期的 ECMO 系统更换(如肺移植、心脏移植的桥接),还是发生了突发的机械性并发症(如 AOT、泵头内血栓形成、离心泵失功等),最终的结局仍然是更换除插管之外的所有 ECMO 系统,本案例亦同。即使最终结局如此,对 ECMO 系统发生何种机械并发症的甄别与判断仍然十分重要,这不仅有助于 ECMO 机械并发症的预防及处理,提高 ECMO 的救治质量,也为 ECMO 中心的发展积累了技术资料。

4 结论

随着 ECMO 技术的进步与推广,离心泵失功是 ECMO 机械并发症中的罕见情况,一旦发生,ECMO 血流量快速下降,其心肺支持功能将受到灾难性的影响,危及患者生命,需要紧急更换泵头或整个 ECMO 系统。目前大多数 ECMO 中心未对泵前后的压力进行常规监测,所以临床对于离心泵失功的判断仍缺乏可视化和量化的技术和指标,同时对其处理也缺乏相应的临床经验。本病例为临床上 ECMO 突发机械性并发症的处理提供了一定的依据和经验,有利于提高 ECMO 的救治质量。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 盖玉彪,郭小靖,辛晨,等. ECMO 快速反应团队的建立和管理实践[J]. 中华危重病急救医学, 2021, 33 (3): 349-351. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20201010-00663.
- [2] 李建伟,梁宏开,吴桂深,等. 体外膜肺氧合在成人急性呼吸窘迫综合征中的临床应用[J]. 中国中西医结合急救杂志, 2017, 24 (1): 40-43. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2017.01.013.
- [3] Paden ML, Conrad SA, Rycus PT, et al. Extracorporeal Life Support Organization registry report 2012 [J]. ASAIO J, 2013, 59 (3): 202-210. DOI: 10.1097/MAT.0b013e3182904a52.
- [4] Thiagarajan RR, Barbaro RP, Rycus PT, et al. Extracorporeal Life Support Organization registry international report 2016 [J]. ASAIO J, 2017, 63 (1): 60-67. DOI: 10.1097/MAT.0000000000000475.
- [5] Lubnow M, Philipp A, Foltan M, et al. Technical complications during veno-venous extracorporeal membrane oxygenation and their relevance: predicting a system-exchange: retrospective analysis of 265 cases [J]. PLoS One, 2014, 9 (12): e112316. DOI: 10.1371/journal.pone.0112316.
- [6] Kim DH, Cho WH, Son J, et al. Catastrophic mechanical complications of extracorporeal membrane oxygenation [J]. ASAIO J, 2021, 67 (9): 1000-1005. DOI: 10.1097/MAT.0000000000001354.
- [7] Sidebotham D, McGeorge A, McGuinness S, et al. Extracorporeal membrane oxygenation for treating severe cardiac and respiratory failure in adults: part 2-technical considerations [J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2010, 24 (1): 164-172. DOI: 10.1053/j.jvca.2009.08.002.
- [8] 黄瑾瑾,叶莉芬,林茹. 婴儿体外膜氧合中血栓形成 1 例并文献复习[J]. 中国体外循环杂志, 2021, 19 (1): 18-21. DOI: 10.13498/j.cnki.chin.j.ecc.2021.01.05.
- [9] Ranasinghe AM, Peek GJ, Roberts N, et al. The use of transesophageal echocardiography to demonstrate obstruction of venous drainage cannula during ECMO [J]. ASAIO J, 2004, 50 (6): 619-620. DOI: 10.1097/01.mat.0000142872.19219.c0.
- [10] 卢桂阳,徐颖,宁耀贵,等. 综合 ICU 中成人人体外膜肺氧合并发症及对预后的危险因素分析[J]. 中国中西医结合急救杂志, 2021, 28 (6): 697-701. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2021.06.012.
- [11] Dornia C, Philipp A, Bauer S, et al. Analysis of thrombotic deposits in extracorporeal membrane oxygenators by multidetector computed tomography [J]. ASAIO J, 2014, 60 (6): 652-656. DOI: 10.1097/MAT.0000000000000133.
- [12] Son KH, Lee SI, Choi CH, et al. Mechanical failure of extracorporeal membrane oxygenation induced by hypertriglyceridemia [J]. Ann Thorac Surg, 2017, 104 (1): e85. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2017.01.107.
- [13] Badulak JH, Curtis E, Bulger EM. ECMO membrane lung failure due to hypertriglyceridemia: a case report and review of the literature [J]. J Extra Corpor Technol, 2020, 52 (3): 237-241. DOI: 10.1182/ject-2000026.
- [14] Zakhary B, Vercaemst L, Mason P, et al. How I approach membrane lung dysfunction in patients receiving ECMO [J]. Crit Care, 2020, 24 (1): 671. DOI: 10.1186/s13054-020-03388-2.
- [15] Lehle K, Philipp A, Müller T, et al. Flow dynamics of different adult ECMO systems: a clinical evaluation [J]. Artif Organs, 2014, 38 (5): 391-398. DOI: 10.1111/aor.12180.
- [16] Lehle K, Philipp A, Gleich O, et al. Efficiency in extracorporeal membrane oxygenation-cellular deposits on polymethylpentene membranes increase resistance to blood flow and reduce gas exchange capacity [J]. ASAIO J, 2008, 54 (6): 612-617. DOI: 10.1097/MAT.0b013e318186a807.
- [17] Lubnow M, Philipp A, Dornia C, et al. D-dimers as an early marker for oxygenator exchange in extracorporeal membrane oxygenation [J]. J Crit Care, 2014, 29 (3): 473. e1-5. DOI: 10.1016/j.jcr.2013.12.008.
- [18] Diehl A, Gantner D. Pump head thrombosis in extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) [J]. Intensive Care Med, 2018, 44 (3): 376-377. DOI: 10.1007/s00134-017-4976-9.
- [19] 吕琳,高国栋,胡金晓,等. 体外膜肺氧合支持中发生严重溶血的危险因素及结局: 一项 5 年的单中心回顾分析[J]. 中华危重病急救医学, 2016, 28 (6): 518-522. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2016.06.009.

(收稿日期: 2022-01-26)