

## • 发明与专利 •

## 一种容积推拉可调的人工死腔的设计与应用

朱宁 苏芮 周建新 李宏亮

首都医科大学附属北京天坛医院重症医学科,北京 100070

通信作者:李宏亮,Email:arnold\_lhl@126.com

**【摘要】** 通过使用人工死腔来纠正低碳酸血症或诱导高碳酸血症,对于特定神经重症疾病的诊断及治疗具有十分特殊的意义。针对具有人工气道(气管插管、气管切开)的患者,当前主要通过呼吸管路Y型接头与患者端之间增加一段延长管来实现上述目的,但延长管的容积往往是固定的,无法灵活适用于个体化诊疗的需要。在经过长期机械通气研究的基础上,首都医科大学附属北京天坛医院重症医学科周建新教授的科研团队设计了一种容积推拉可调的人工死腔,并获得了国家实用新型专利(专利号:ZL 2020 2 0496413.4)。该人工死腔结构简单,由桶体、活塞头及推拉杆构成,可通过自由调整人工死腔容积的大小来实现对目标二氧化碳的精准调控,在纠正低碳酸血症或诱发高碳酸血症的同时实现纠正自发性过度通气,以达到终止顽固性呃逆以及缩短脑死亡临床诊断中呼吸暂停试验的操作时间等目的,具有可靠性强、操作方便、生产成本低等优点,极大地方便了相关科研及临床诊疗的开展。

**【关键词】** 人工死腔; 二氧化碳; 过度通气; 呃逆; 呼吸暂停试验

**基金项目:** 国家实用新型专利(ZL 2020 2 0496413.4);首都临床诊疗技术研究及转化应用项目(Z201100005520079)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20210715-01055

**Design and application of a push-pull adjustable artificial dead space**

Zhu Ning, Su Rui, Zhou Jianxin, Li Hongliang

Department of Critical Care Medicine, Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070, China

Corresponding author: Li Hongliang, Email: arnold\_lhl@126.com

**【Abstract】** Using artificial dead space to correct hypocapnia or induce hypercapnia is of particular significance for diagnosing and treating specific neurocritical diseases. At present, the above purpose is mainly achieved by adding an extension tube between the Y-type connector of the ventilator and the artificial airway in clinical practice. However, its volume is often fixed and cannot adapt to the individualized diagnosis and treatment in different clinical scenarios. The research group led by Professor Zhou Jianxin from the department of critical care medicine of Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, has designed an artificial dead cavity with adjustable volume based on years of research in the respiratory field and has been granted a national utility model patent (patent number: ZL 2020 2 0496413.4). The artificial dead chamber is simple in structure, composed of a barrel body, a piston head, and a push-pull rod. By freely adjusting the size of the artificial dead chamber volume, it can accurately regulate the target carbon dioxide, correct the spontaneous hyperventilation, terminate intractable hiccup, and shorten the operation time of asphyxia test in clinical diagnosis of brain death while correcting hypocapnia or inducing hypercapnia. It has the advantages of solid reliability, convenient operation, and low production cost, which significantly facilitates scientific research and clinical diagnosis and treatment.

**【Key words】** Artificial dead space; Carbon dioxide; Hyperventilation; Hiccup; Apnea test

**Fund program:** National Utility Model Patent of China (ZL 2020 2 0496413.4); Capital Clinical Diagnosis and Treatment Technology Research and Transformation Application (Z201100005520079)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20210715-01055

人体的呼吸系统主要由参与气血交换的肺泡和负责气体运输的呼吸道组成。由于呼吸道不具有气体交换的功能,又被称为解剖死腔,健康成年人解剖死腔容积约为2.2 mL/kg。在呼吸道以外,额外增加的不参与气体交换的空腔被称为人工死腔(例如人工气道与呼吸机管路Y型接头之间的延长管)。人工死腔的存在会因部分气体的重复吸入导致二氧化碳清除效率降低,相应带来动脉血二氧化碳分压(arterial partial pressure of carbon dioxide, PaCO<sub>2</sub>)升高甚至引起高碳酸血症。虽然过高的PaCO<sub>2</sub>通常对人体是有害的,但通过医源性增加人工死腔的容积来提高PaCO<sub>2</sub>水平,对

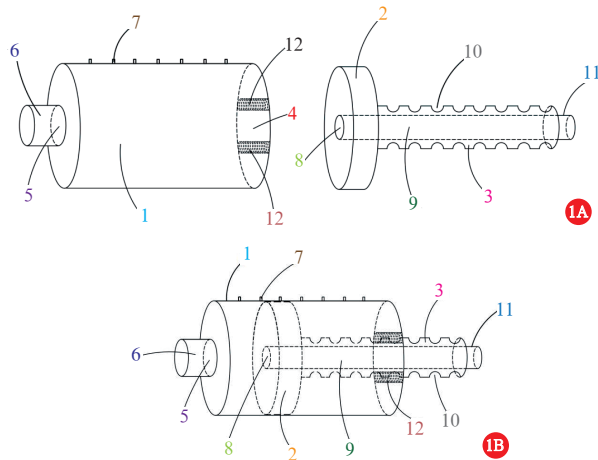
于特定的神经重症如纠正严重的自发性过度通气<sup>[1]</sup>、治疗顽固性呃逆<sup>[2]</sup>、缩短脑死亡临床诊断标准中呼吸暂停试验(apnea test)的操作时间<sup>[3]</sup>等,却有助于实现相应的诊断及治疗目的。

针对处于上述疾病状态下且保留人工气道(气管插管、气管切开)的患者,目前主要通过呼吸机管路Y型接头与人工气道间加入一段延长管来增加人工死腔。然而,临床中采用的多是规格相对固定的延长管(不同生产厂家产品的长度、容积略有差异),其初始目的主要是为了减少因吸痰、纤维支气管镜等床旁操作而被迫中断机械通气治疗。对于不

同病因及病情严重程度的患者而言,固定容积的人工死腔无法满足精细化诊疗的需求。为了克服上述现有技术的不足并满足相关临床操作需求,我们在前期大量机械通气相关领域研究的基础上,设计了一种容积推拉可调的人工死腔,并获得了国家实用新型专利(专利号:ZL 2020 2 0496413.4),现将具体技术细节介绍如下。

**1 容积推拉可调的人工死腔的构成及使用方法**

**1.1 容积推拉可调的人工死腔的构成(图1):**该容积推拉可调的人工死腔由桶体(图1-1)、活塞头(图1-2)、推拉杆(图1-3)及弹性卡槽(图1-4)组成。桶体为透明聚乙烯材质,一端为开口端,另一端设有第一通气口(图1-5)和与之连通的第一管接头(图1-6),桶体的外壁上设有刻度标记(图1-7)。桶体的一端通过第一管接口与呼吸机回路连接,另一端与活塞头共同构成容积可变的腔体,从而实现人工死腔容积的调节。活塞头为黑色橡胶材质,与桶体紧密连接,具有较好的密封性,其上设有第二通气口(图1-8)。具体使用时,黑色材质便于观察活塞头的位置,通过刻度标记可以实时判定桶内有效容积的大小。推拉杆内设有通气道(图1-9)、定位槽(图1-10)和第二管接口(图1-11)。通气道一端与第二通气口相对且连接于活塞头,另一端设有第二管接头并与人工气道(气管插管、气管切开)连接。弹性卡槽由两个弹簧(图1-12)组成。设定推拉杆的截面直径略大于弹性卡槽宽度,后者可通过配合定位槽有效固定推拉杆。



注:1为桶体,2为活塞头,3为推拉杆,4为弹性卡槽,5为第一通气口,6为第一管接头,7为刻度标记,8为第二通气口,9为通气道,10为定位槽,11为第二管接头,12为弹簧

**图1 一种容积推拉可调的人工死腔的结构分解图(A)及结构示意图(B)**

**1.2 使用方法:**该专利产品的使用类似于注射器的推拉移动,区别主要在于装置两侧均具有通气口且可以通过卡槽装置实现容积的有效固定。当该装置静止时,推拉杆上的一个定位槽处于弹性卡槽内,保证装置容积的稳定。当具体使用时,通过调整推拉杆位置使定位槽随推拉杆发生位移,进而从弹性卡槽中移出。由于推拉杆的截面直径略大于弹性卡槽宽度,使得弹性卡槽发生形变直到下一个定位槽进入

其中,弹簧恢复形变,再次形成推拉杆新的固定,以此完成一次桶体与活塞头之间的容积变化,实现人工死腔容积的动态调节。

**2 优点**

本专利产品具有可靠性强、操作方便、生产成本低等优势。首先,该产品通过卡接结构可以在满足推拉杆定位的同时避免推拉杆调节后发生移动而导致内腔容积发生变化,具有较强的可靠性;其次,通过调节推拉杆使活塞头在桶体内发生位移,从而改变桶体与活塞头之间的内腔容积大小,实现人工死腔容积的精细化调节,操作简单方便。此外,相比目前临床上使用的容积固定的延长管,本实用新型专利可通过调节人工死腔容积的大小满足不同基础状态下患者的差异性特征;同时在持续呼气末二氧化碳水平监测的情况下,这种调整将更为精准,并可定量分析,评估其使用效果。

**3 讨论**

二氧化碳作为重要的脑血管调节因子,在神经重症患者的诊断及治疗中扮演着重要角色。利用二氧化碳重复吸入的原理,人工死腔可有效升高 PaCO<sub>2</sub> 并适用于特定疾病的诊断及治疗,如纠正严重的自发性过度通气、治疗顽固性呃逆、缩短脑死亡临床诊断标准中呼吸暂停试验的操作时间等。

自发性过度通气在神经重症患者中具有较高的发生率,强烈的自主呼吸驱动会显著增加患者的呼吸频率和分钟通气量,进而引起严重的低碳酸血症。作为重要的脑血管调节因子,二氧化碳水平的降低会通过缩小颅内小动脉血管的管径来减少脑血流、脑血容量,进而增加局部脑组织缺血的风险<sup>[4]</sup>。多项研究显示,自发性过度通气可延长急性脑损伤患者的住院时间,增加病死率,并与远期神经功能预后不良密切相关<sup>[5-7]</sup>。对于急性颅脑损伤患者,推荐维持正常水平的 PaCO<sub>2</sub> (35 ~ 45 mmHg, 1 mmHg=0.133 kPa)<sup>[8]</sup>。目前临床上多采用镇静镇痛和(或)神经肌肉阻滞剂来抑制呼吸驱动、选择控制通气模式等方法改善过度通气,但前者会增加神经重症患者神经功能评估的难度及并发症的发生率,而后者往往会面临严重的人机对抗。有研究显示,通过添加人工死腔的方式增加二氧化碳重复吸入可在一定程度上缓解低碳酸血症<sup>[1,9]</sup>,但长度及容积均固定不变的延长管无法针对不同患者的具体情况对目标 PaCO<sub>2</sub> 水平进行精确的调节。本专利产品能通过精确调节死腔容积大小来满足患者目标 PaCO<sub>2</sub> 水平的需求,进而实现自发性过度通气的有效纠正。

呃逆是指呼吸肌肉的一种不自主的痉挛性收缩,其典型表现为突然的、短促的吸气,并以声门突然关闭而告终。顽固性呃逆(呃逆持续时间>48 h)在神经重症患者中并不少见<sup>[10-12]</sup>。除了引起患者及家属等不良情绪外,顽固性呃逆可在机械通气患者中诱发严重的人机对抗,因呼吸机频繁的气道峰压过高或过低报警,导致机械通气无法顺利进行。此外,顽固性呃逆也会影响肠内营养的正常实施,情况严重者会出现营养不良,体质量下降乃至脱水<sup>[13]</sup>。临床中关于顽固性呃逆的非药物治疗手段包括按压颈动脉窦、牵引舌头、冰水刺激、呼吸暂停以及针灸等,但临床效果差异性较大<sup>[14]</sup>。

研究显示,诱导性高碳酸血症可通过刺激位于延髓的化学感受器有效终止顽固性呃逆,是临床可供采用的重要治疗手段之一<sup>[2, 15]</sup>。本专利产品能通过有效调节死腔容积的大小诱导产生不同程度的高碳酸血症,从而纠正患者呃逆。

脑死亡的临床诊断对于有限临床医疗资源的合理分配以及器官移植专业的发展具有重要的临床和社会意义。呼吸暂停试验可通过升高 PaCO<sub>2</sub>、降低脑脊液 pH 值进而刺激位于延髓的呼吸中枢,常用于判断患者是否存在自主呼吸努力,是脑死亡临床诊断标准中的重要组成部分<sup>[16-18]</sup>。由于人体在无自主呼吸的情况下 PaCO<sub>2</sub> 上升速度约为 3 mmHg/min,为了等待其从基线水平升高到既定目标 (≥60 mmHg 或较基础水平升高 ≥20 mmHg),至少需要脱机 8~10 min。如此长时间的脱机可能引起严重的低氧血症、血流动力学波动乃至恶性心律失常,迫使提前放弃呼吸暂停试验<sup>[19-22]</sup>。如何在保证呼吸暂停试验顺利进行的同时有效减少上述并发症的发生具有重要的临床意义。利用人工死腔增加二氧化碳重复吸入的原理可加速患者 PaCO<sub>2</sub> 的升高,有助于缩短呼吸暂停试验所需的时间,进而提高其完成率。本专利产品能通过灵活调节死腔容积的大小快速升高患者目标 PaCO<sub>2</sub> 水平,以缩短呼吸暂停试验时间及提高完成率。

综上,人工死腔的容积大小是否灵活可调对于个体化应用至关重要,为此我们设计了一种容积推拉可调的人工死腔。该产品结构简单、可靠性强,可通过推拉杆的位移动态调节人工死腔的容积大小,在纠正低碳酸血症或者诱发高碳酸血症的同时,实现纠正自发性过度通气,达到终止顽固性呃逆以及缩短脑死亡临床诊断中呼吸暂停试验的操作时间等目的,在相关研究领域的动物实验及临床诊疗中具有较高的实用价值。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参考文献

- [1] Sweidan AJ, Bower MM, Paullus J, et al. Refractory central neurogenic hyperventilation: a novel approach utilizing mechanical dead space [J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 937. DOI: 10.3389/fneur.2019.00937.
- [2] Obuchi T, Shimamura S, Miyahara N, et al. CO<sub>2</sub> retention: the key to stopping hiccups [J]. *Clin Respir J*, 2018, 12 (8): 2340-2345. DOI: 10.1111/erj.12910.
- [3] Ahlwat A, Carandang R, Heard SO, et al. The modified apnea test during brain death determination: an alternative in patients with hypoxia [J]. *J Intensive Care Med*, 2016, 31 (1): 66-69. DOI: 10.1177/0885066615599086.
- [4] Godoy DA, Rovegno M, Lazaridis C, et al. The effects of arterial CO<sub>2</sub> on the injured brain: two faces of the same coin [J]. *J Crit Care*, 2021, 61: 207-215. DOI: 10.1016/j.jccr.2020.10.028.
- [5] Esnault P, Roubin J, Cardinale M, et al. Spontaneous hyperventilation in severe traumatic brain injury: incidence and association with poor neurological outcome [J]. *Neurocrit Care*, 2019, 30 (2): 405-413. DOI: 10.1007/s12028-018-0639-0.
- [6] Li KC, Tam CWY, Shum HP, et al. Impact of hyperoxia and hypocapnia on neurological outcomes in patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage: a retrospective study [J]. *Crit Care Res Pract*, 2019, 2019: 7584573. DOI: 10.1155/2019/7584573.
- [7] Hextrum S, Minhas JS, Liotta EM, et al. Hypocapnia, ischemic lesions, and outcomes after intracerebral hemorrhage [J]. *J Neurol Sci*, 2020, 418: 117139. DOI: 10.1016/j.jns.2020.117139.
- [8] 汤睿,周敏.机械通气对急性颅脑损伤患者肺脑保护作用的研究进展 [J]. *中华危重病急救医学*, 2020, 32 (12): 1533-1536.

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20200917-00632.

Tang R, Zhou M. Advances in lung and brain protection of mechanical ventilation in patients with acute brain injury [J]. *Chin Crit Care Med*, 2020, 32 (12): 1533-1536. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20200917-00632.

- [9] 温韬雪,唐永林.增加死腔在过度通气患者中的应用观察 [J]. *护理学杂志*, 2012, 27 (15): 24-25. DOI: 10.3870/hlxzz.2012.15.024.
- [10] Rouse S, Wodziak M. Intractable hiccups [J]. *Curr Neurol Neurosci Rep*, 2018, 18 (8): 51. DOI: 10.1007/s11910-018-0856-0.
- [11] Chang FY, Lu CL. Hiccup: mystery, nature and treatment [J]. *J Neurogastroenterol Motil*, 2012, 18 (2): 123-130. DOI: 10.5056/jnm.2012.18.2.123.
- [12] Got T, Vivas L, Fan C, et al. Treatment of hiccups in stroke rehabilitation with gabapentin: a case series and focused clinical review [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2021, 28 (6): 475-480. DOI: 10.1080/10749357.2020.1834274.
- [13] Jeon YS, Kearney AM, Baker PG. Management of hiccups in palliative care patients [J]. *BMJ Support Palliat Care*, 2018, 8 (1): 1-6. DOI: 10.1136/bmjspcare-2016-001264.
- [14] Hosoya R, Uesawa Y, Ishii-Nozawa R, et al. Analysis of factors associated with hiccups based on the Japanese Adverse Drug Event Report database [J]. *PLoS One*, 2017, 12 (2): e0172057. DOI: 10.1371/journal.pone.0172057.
- [15] Merenkov VV, Kovalev AN. Hiccups in the neuro ICU: a problem of respiratory support [J]. *J Neurosurg Anesthesiol*, 2013, 25 (2): 209-210. DOI: 10.1097/ANA.0b013e318285b1f2.
- [16] Greer DM, Shemie SD, Lewis A, et al. Determination of brain death/death by neurologic criteria: the World Brain Death Project [J]. *JAMA*, 2020, 324 (11): 1078-1097. DOI: 10.1001/jama.2020.11586.
- [17] 马明,李俊杰,田大治,等.脑死亡器官获取单中心经验探讨 [J/CD]. *实用器官移植电子杂志*, 2018, 6 (6): 467-469. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5332.2018.06.014.
- [18] 国家卫生健康委员会脑损伤质控评价中心,中华医学会神经病学分会神经重症协作组,中国医师协会神经内科医师分会神经重症专业委员会.中国成人脑死亡判定标准与操作规范(第二版)[J]. *中华医学杂志*, 2019, 99 (17): 1288-1292. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2019.17.003.
- [19] Brain Injury Evaluation Quality Control Center of National Health Commission, Neurocritical Care Cooperative Group of Neurology Branch of Chinese Medical Association, Neurocritical Care Professional Committee of Neurophysicians Branch of Chinese Medical Association. Chinese adult human brain death determination standard and operation standard (2nd edition) [J]. *Natl Med J China*, 2019, 99 (17): 1288-1292. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2019.17.003.
- [20] Sayan HE. Retrospective analysis of the apnea test and ancillary test in determining brain death [J]. *Rev Bras Ter Intensiva*, 2020, 32 (3): 405-411. DOI: 10.5935/0103-507X.20200069.
- [21] Wijdicks EF, Rabinstein AA, Manno EM, et al. Pronouncing brain death: contemporary practice and safety of the apnea test [J]. *Neurology*, 2008, 71 (16): 1240-1244. DOI: 10.1212/01.wnl.0000327612.69106.4c.
- [22] 马朋林,杨明施,李秦,等.脑死亡患者实施呼吸暂停试验安全性的临床研究 [J]. *中国危重病急救医学*, 2006, 18 (5): 260-263. DOI: 10.3760/j.issn.1003-0603.2006.05.002.
- [23] Ma PL, Yang MS, Li Q, et al. Study on safety of apnea test in clinical determination of brain death [J]. *Chin Crit Care Med*, 2006, 18 (5): 260-263. DOI: 10.3760/j.issn.1003-0603.2006.05.002.
- [24] 杜宏生,李牧,马景璧.临床脑死亡病例判定 12 例报告 [J/CD]. *实用器官移植电子杂志*, 2016, 4 (5): 286-290. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5332.2016.05.006.
- [25] Du HS, Li M, Ma JJ. A discussion of determination on clinical diagnosis of brain death in twelve patients [J/CD]. *Prac J Organ Transplant (Electronic Version)*, 2016, 4 (5): 286-290. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5332.2016.05.006.

(收稿日期: 2021-07-15)