DOI:10.16016/j.1000-5404.201905009

一种具有双通道恒定泄气量功能的无创正压通气面罩研制及应用效果评价

黄 桃[1],王 华[2],徐 钦[3] 400016 重庆,重庆医科大学:附属第一医院重症医学科[1],生物医学工程学院[2];400010 重庆,重庆医科大学附属第二医院老年科[3]

[摘要] **目的** 探讨一种具有双通道恒定泄气量功能(two channels and constant leakage ,TCCL)的无创正压通气(noninvasive positive pressure ventilation,NPPV)面罩研制及应用效果。**方法** 完成 TCCL 面罩的发明设计、三维构建和产品制造。利用 24 例健康人进行 NPPV 试验,根据不同的 NPPV 面罩类型,按随机数字表法分为 2 组:研究组采用 TCCL 面罩;对照组采用普通型 NPPV 面罩。标准化实验条件下,呼气气道正压(expiratory positive airway pressure, EPAP)为 5、10 cmH_2O 时,监测两组面罩内呼气末二氧化碳分压(pressure of end-tidal carbon dioxide,$PetCO_2$)变化;测试呼吸机吸入气体氧气浓度(FiO_2)分别为 30%、50%,且吸气气道正压(inspiratory positive airway pressure, IPAP)分别为 10、20 cmH_2O 时,监测面罩内 FiO_2 变化。**结果** 标准化试验条件下,相同 EPAP 水平(5 cmH_2O 或 10 cmH_2O)时,研究组面罩内 $PetCO_2$ 均显著低于对照组($P<0.05$);相同 FiO_2 水平(FiO_2 为 30%或 50%)及 IPAP 为 10、20 cmH_2O 时,两组组内及组间面罩内 FiO_2 比较差异均无统计学意义。**结论** TCCL 面罩对面罩内 CO_2 的清除效果优于普通型 NPPV 面罩且不影响吸入气体 O_2 浓度。

[关键词] 无创正压通气面罩;双通道;恒定泄气量;呼气末二氧化碳分压;二氧化碳重复呼吸
[中图法分类号] R197.39;R605.973 [文献标志码] A

Development and efficiency of a noninvasive positive pressure ventilation *via* face mask with 2 channels and constant leakage

HUANG Tao[1], WANG Hua[2], XU Qin[3] [1]Department of Critical Care Medicine, the First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, [2]Biomedical Engineering College, Chongqing Medical University, Chongqing, 400016; [3]Department of Geriatrics, the Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing, 400010, China

[**Abstract**] **Objective** To explore the preparation and efficiency of a positive pressure ventilation (NPPV) *via* face mask with 2 channels and constant leakage function (TCCL). **Methods** The NPPV-TCCL *via* face mask was invented, designed, three-dimensionally constructed and manufactured by our team. Twenty-four healthy individuals were recruited and randomly divided into the test group and the control group to wear our produced NPPV-TCCL *via* face mask and conventional NPPV via face mask, respectively. Under standard experimental conditions with expiratory positive airway pressure (EPAP) of 5 and 10 cmH_2O, the pressure of end-tidal carbon dioxide ($PetCO_2$) was monitored in the mask. The inspired oxygen fraction (FiO_2) was monitored in the mask when the FiO_2 parameters of the ventilator were set to 30% and 50%, and inspiratory positive airway pressure (IPAP) was 10 and 20 cmH_2O respectively. **Results** Under standard experimental conditions and at the same level of EPAP (5 or 10 cmH_2O), the $PetCO_2$ in the mask was significantly lower in the test group than the control group (all $P<0.05$). At the same level of FiO_2(30% or 50%) and IPAP = 10 or 20cmH_2O, there was no significant difference in FiO_2 between the 2 groups ($P>0.05$). **Conclusion** NPPV-TCCL *via* face mask is superior to conventional NPPV mask in eliminating CO_2 and having no effect on FiO_2.

[基金项目] 重庆市科卫联合医学科研项目(2019MSXM002)
[通信作者] 徐 钦,E-mail:1295056703@qq.com

[**Key words**] noninvasive positive pressure ventilation mask; two channels; constant leakage; pressure of end-tidal carbon dioxide; carbon dioxide rebreathing

Supported by the Medical Research Project funded jointly by Chongqing Science and Technology Commission and Chongqing Health Committee (2019MSXM002). Corresponding author: XU Qin, E-mail: 1295056703@qq.com

无创正压通气(noninvasive positive pressure ventilation,NPPV)是指通过鼻罩、口鼻面罩等无创方式与患者相连接而进行的辅助正压机械通气。NPPV 已广泛应用于Ⅱ型呼吸衰竭患者救治[1-2]。但因现有 NPPV 面罩内存在显著死腔效应,易致 CO_2 重复呼吸[3]。当 NPPV 治疗慢性阻塞性肺疾病等合并 CO_2 潴留患者时,常因面罩内存在较大的死腔气体量,导致显著的 CO_2 重复呼吸和较高的呼气末二氧化碳分压(pressure of end-tidal carbon dioxide,$PetCO_2$),可能进一步加重患者 CO_2 潴留水平,从而影响 NPPV 治疗效果[4-5]。现针对 NPPV 应用中死腔效应问题的研究主要集中于优选呼气阀类型[6-7]、面罩形状结构优化[8]、增加呼气阀泄漏量[9]、延长呼气时间及潮气量[10-12]等措施,但上述这些措施对面罩内 CO_2 的清除效果并不理想。为此,本研究设计一种具有双通道恒定泄气量功能的 NPPV 面罩,简称双通道恒定泄气量(two channels and constant leakage,TCCL)面罩,完成 TCCL 面罩三维实体模型构建和样品制造,并通过健康人 NPPV 实验证实此面罩可显著降低面罩内 CO_2 浓度。现报告如下。

1 材料与方法

1.1 系统设计

1.1.1 TCCL 面罩设计思路 呼气阀传统安装部位是在呼吸机管道和面罩之间,此种安装方式操作简单,但 NPPV 面罩内(一般中等型号鼻罩死腔量约为 105 mL、口鼻面罩死腔容量约 250 mL)、呼气阀与面罩之间的呼吸机管道均存在吸气流和呼气流的气体共用通道问题,可能是导致面罩内 CO_2 重复呼吸的主因。同时,患者呼气时需对抗呼吸机基础气流(在呼气后期呼吸机回路维持的 1 个持续气流即为基础气流,以协助吸气触发)的阻碍才能呼出气体,从而额外增加患者呼吸肌功耗。为解决上述问题,我们仔细分析无创呼吸机工作原理、与患者连接方式、呼气阀类型、安装部位及结合国内外研究进展,提出:①将呼气阀由传统安装部位(呼吸机管道与面罩之间)改置于面罩前端;②采用平台型呼气阀。通过 NPPV 实验模型证实:同种呼气阀(平台型呼气阀或单孔型呼气阀)改置于面罩前端时,面罩内、气管内 $PetCO_2$ 显著低于呼气阀传统安装部位;当呼气阀安装于同一位置时,平台型呼气阀更有利于排出 CO_2[13]。据此,我们技术集成利于解决面罩内死腔效应的呼气阀位置优化(改置于面罩前端)和优势类型(平台型呼气阀),发明设计 TCCL 面罩。

1.1.2 TCCL 面罩结构 TCCL 面罩为将平台型呼气阀一体化设计于面罩前端的 NPPV 口鼻罩类型。TCCL 面罩包括面罩本体、吸气通道及呼气通道(图 1A、B),吸气通道和呼气通道均位于面罩本体前端,吸气通道设置在的呼气通道下边缘。面罩本体包括口部和鼻部,口部相对鼻部向外凸出,且口部和鼻部的连接处采用圆弧处理。吸气通道包括直管部和弯管部,呼吸机管道通过直管部与面罩相连接,弯管部的一端和直管部连接,另一端与面罩本体连接,且弯管部和面罩本体连接处的外周面安装有固定环。吸气通道的中心位于面罩本体的中轴线上,且吸气通道的中心至面罩本体下边缘长度为整个面罩本体高度的 1/2~1/6。呼气通道包括平台型呼气阀和丝状连接头。平台型呼气阀主要包括阀体和阀体中变形膜片。变形膜片设有泄气孔,并且在变形膜片外周面设有三点式加固条,防止变形膜片在气压作用下脱落。丝状连接头一端连接平台型呼气阀,另一端连接面罩本体,且呼气通道与面罩本体是一体化成型设计。呼气通道的中心位于面罩本体的中轴线上,且呼气通道的中心至面罩本体下边缘长度为整个面罩本体高度的 1/4~3/4。此外,面罩通过第 1、2 锁定扣与头带相连接,面罩本体通过硅胶密封部与患者相连接。

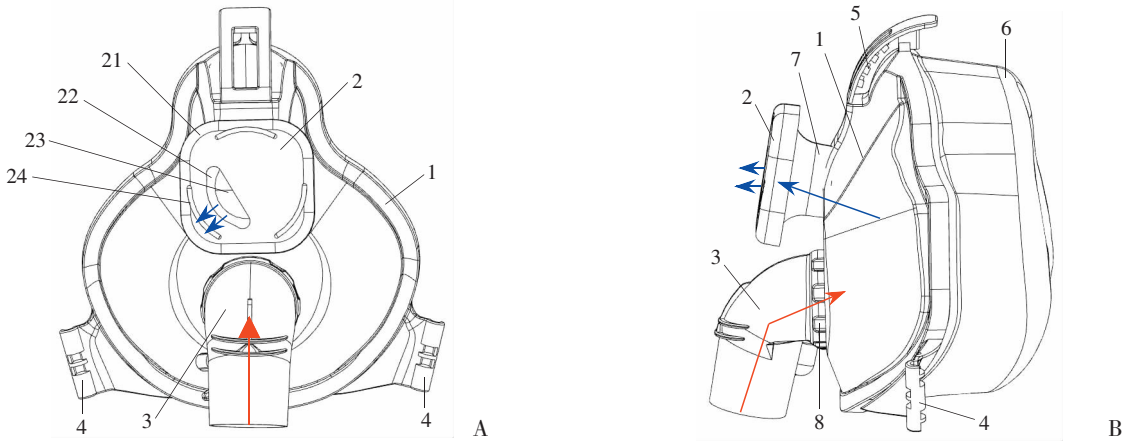
1.1.3 TCCL 面罩创新点及工作原理 TCCL 面罩设计双通道(图 1)独立分布,解决了面罩内、呼气阀与面罩之间管道的吸气流和呼气流的气体共用通道问题,可利用呼吸机的基础气流冲刷面罩内的残留气体,从而促进了死腔气体排出并减少 CO_2 重复呼吸量。双通道设计还基本消除呼吸机基础气流额外增加患者呼吸肌功耗的问题。此外,吸气通道和呼气通道在面罩本体上的具体位置是优化的位置,能够显著改变鼻孔附近的空气流速以及流场形态,从而使得面罩本体中的 CO_2 浓度更低。呼气通道的呼气阀采用平台型呼气阀设计,当呼吸回路处于高压力状态时(通常在吸气相),平台型呼气阀的变形膜片上抬,使平台型呼

气阀泄气孔变小,致使泄气量相对较小,以利于稳定吸入气体氧气浓度(inspired oxygen fraction,FiO_2);而当呼吸回路处于低压力状态时(通常在呼气相),平台型呼气阀的变形膜片回缩,使平台型呼气阀的泄气孔变大,致使泄气量相对较大,以利于促进 CO_2 排出。因此,平台型呼气阀的变形膜片具有根据呼吸回路压力波动而动态控制泄气孔大小维持泄气量相对恒定的功能,可实现在不影响面罩内吸入气体 FiO_2 和减少人机拮抗的情况下解决面罩内 CO_2 重复呼吸问题,对 TCCL 面罩安全应用具有重要价值。

总之,TCCL 面罩通过双通道设计理论上可解决 NPPV 面罩内死腔效应及 CO_2 重复呼吸问题,并解决呼气时因对抗呼吸机基础气流而额外增加呼吸肌功耗的问题;通过平台型呼气阀设计可确保面罩内稳定的吸入气体 FiO_2 和减少人机拮抗。

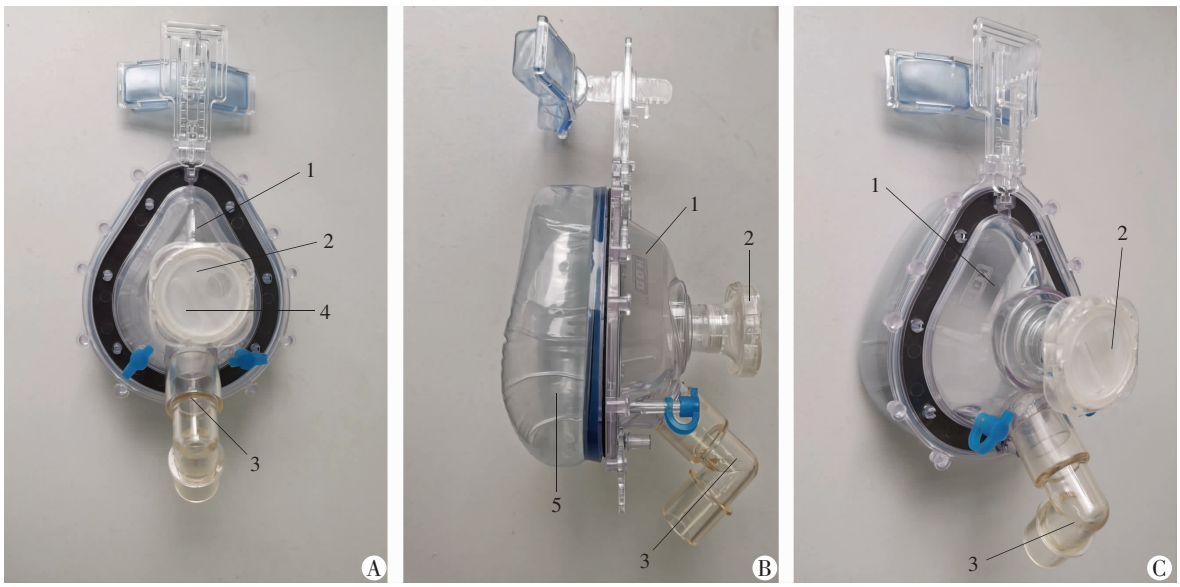
1.2　TCCL 面罩产品制造

利用 Solidworks 软件构建 TCCL 面罩三维实体模型,并与博谊(上海)工业有限公司合作,经过手工打样、样品模具制作及生产模具制作 3 个阶段,完成 TCCL 面罩产品制造(图 2)。



A、B:分别为 TCCL 面罩正面、侧面图　1:面罩本体;2:平台型呼气阀(21:阀体;22:泄气孔;23:变形膜片;24:加固条);3:吸气通道;4:第 1 锁定扣;5:第 2 锁定扣;6:硅胶密封部;7:丝状连接头;8:固定环;红色箭头表示吸气流;蓝色箭头表示呼气流

图 1　TCCL 面罩设计结构图



A:正面观;B:侧面观;C:斜面观　1:面罩本体;2:平台型呼气阀;3:吸气通道;4:泄气孔;5:硅胶密封部

图 2　TCCL 面罩产品实体外观图

1.3　TCCL 面罩应用效果评价

1.3.1　研究对象、面罩类型及分组　　选择 24 例健康人作为研究对象,男性 13 例,女性 11 例,年龄(32.0±6.2)岁。通过 NPPV 面罩将无创呼吸机(美国 Philips 公司生产的 V60)与研究对象相连接而进行 NPPV 试验,NPPV 试验测试中利用呼气阀排出面罩、呼吸管道等呼吸回路气体。采用计算机随机数字法将研究对象分为 2 组,每组各 12 例:研究组应用 TCCL 面罩(M 号,死腔容量约为 240 mL;平台型呼气阀一体化设计于面罩前端,图 3);对照组采用普通型 NPPV 面罩即德国公司生产的 ClassicStar SE 口鼻面罩(M 号,死腔容量为 240 mL),平台型呼气阀(Respironics,USA)安装在呼吸机管道与面罩之间(图 4)。

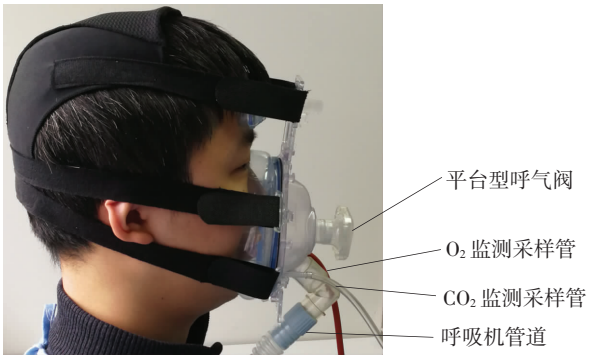


图 3　研究组 TCCL 面罩连接图

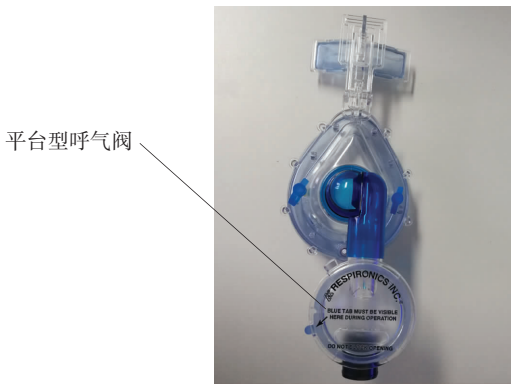


图 4　对照组普通型 NPPV 面罩连接图

1.3.2　数据监测　　利用迈瑞 Beneview T1 监护仪 CO_2 旁流模块持续监测面罩内 $PetCO_2$,并利用杭州艾普仪器设备有限公司生产的 CY-12C 便携式氧浓度测定仪持续监测面罩内吸入气体 FiO_2(图 5)。$PetCO_2$ 和 FiO_2 均间隔 3 min 记录 1 次数值,总计 20 次。

CO_2 旁流模块和氧浓度测定仪在监测前均需完成校零工作。

CO_2 旁流模块基本工作流程:通过 CO_2 监测采样管采集面罩内气体,并经过水槽过滤水分后输入 CO_2 旁流模块而完成 $PetCO_2$ 数据分析。氧浓度测定仪基本工作流程:通过 O_2 监测采样管采集面罩内气体,利用氧电池分析氧浓度,并通过氧浓度测定仪主机显示其数值。



1:CO_2 旁流模块(1.1:水槽;1.2:CO_2 监测采样管);2:氧浓度测定仪主机(2.1:O_2 监测采样管;2.2:球囊;2.3:氧电池);3:TCCL 面罩;4:呼吸机管道

图 5　NPPV 面罩内 $PetCO_2$ 和 FiO_2 参数监测设备

1.3.3　实验步骤　　①呼吸机标准化实验条件:Philips V60 测试呼吸机设置参数[自主/时间控制模式(ST),呼吸频率(f)为 12 次/min,时间(T)为 1.5 s,FiO_2 为 50%,吸气气道正压(inspiratory positive airway pressure,IPAP)为 10 cmH_2O,呼气气道正压(expiratory positive airway pressure,EPAP)为 5 cmH_2O,Patient Leak 漏气率<35 L/min。标准化实验条件作为下列实验程序的基本设置参数]。②在标准化实验条件及 EPAP 为 5、10 cmH_2O 的条件下,监测两组面罩内 $PetCO_2$ 变化。③在标准化实验条件下,测试呼吸机 FiO_2 参数分别设置为 30%、50% 且 IPAP 分别设为 10、20 cmH_2O 时,监测面罩内 FiO_2 变化。

1.4　统计学分析

应用 SPSS 19.0 统计软件。试验数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示。两组相同试验条件下,组间面罩内 $PetCO_2$ 及不同试验条件下的组内 $PetCO_2$ 比较均采用独立样本 t 检验。检验水准:$\alpha=0.05$。

2　结果

2.1　两组面罩受试对象 $PetCO_2$ 的比较

在标准化实验条件及 EPAP 为 5、10 cmH_2O 时,在相同 EPAP 水平(5 cmH_2O 或 10 cmH_2O),研究组面罩内 $PetCO_2$ 均显著低于对照组($P<0.05$);在不同 EPAP 水平(5 cmH_2O、10 cmH_2O),两组组内 $PetCO_2$ 比较差异均没有统计学意义(表 1)。

表 1 标准化试验条件及不同 EPAP 水平时两组面罩内 $PetCO_2$ 比较(mmHg, $\bar{x}\pm s$)

组别	n	EPAP 5 cmH_2O	EPAP 10 cmH_2O
研究组	12	1.8±1.2[a]	1.2±0.8[a]
对照组	12	21.9±1.6	20.2±1.2

a:$P<0.05$,与对照组比较

2.2 呼吸机不同 FiO_2 和 IPAP 参数设置时两组面罩内 FiO_2 的比较

在标准化试验条件下,呼吸机 FiO_2 为 30%、50%且 IPAP 分别设为 10、20 cmH_2O 时,两组组内及组间面罩内 FiO_2 比较差异均无统计学意义(表 2)。

表 2 呼吸机不同 FiO_2 和 IPAP 参数设置时两组面罩内 FiO_2(%)比较(%,$\bar{x}\pm s$)

组别	n	FiO_2 30%		FiO_2 50%	
		IPAP 10 cmH_2O	IPAP 20 cmH_2O	IPAP 10 cmH_2O	IPAP 20 cmH_2O
研究组	12	28.2±0.8	28.9±1.2	46.4±1.3	48.5±1.5
对照组	12	29.5±0.7	28.5±1.1	47.1±0.8	48.9±1.1

3 讨论

有研究表明呼气末 NPPV 面罩内残留的 CO_2 浓度越低,CO_2 重复呼吸量就越少[14]。因此,降低 NPPV 面罩内 $PetCO_2$ 则可实现减少 CO_2 重复呼吸的目的。清除 NPPV 面罩内 CO_2 的关键在于减少面罩内死腔气体量,促进 CO_2 排出。为此,我们研制 TCCL 面罩,以期解决面罩内死腔效应及 CO_2 重复呼吸问题。

本研究发现:在相同 EPAP 水平(5 cmH_2O 或 10 cmH_2O),研究组面罩内 $PetCO_2$ 均显著低于对照组($P<0.05$)。说明 TCCL 面罩对面罩内 CO_2 清除效果显著优于普通型 NPPV 面罩。主要理论依据是 TCCL 面罩采用双通道(吸气通道、呼气通道)独立分布设计,可利用呼吸机气流冲刷面罩内残留气体,促进死腔气体排出,从而减少面罩内 CO_2 重复呼吸量。有研究通过计算流体动力学的方法分析全脸式呼吸机面罩内 CO_2 潴留及流场特征变化,发现在呼气阀相同排气面积下,将呼气阀的排气孔设计在面罩前端与面罩上端、两侧及底部区比较,其鼻腔前端及附近区域的气流速度显著增高及 CO_2 浓度显著降低[14-15]。此外,在不同 EPAP 水平(5 cmH_2O、10 cmH_2O),两组组内面罩内 $PetCO_2$ 比较差异均没有统计学意义。说明呼吸回路内压力波动对面罩内 $PetCO_2$ 的影响并不显著。

本研究中,在标准化实验条件下,相同 FiO_2 水平(FiO_2 为 30%或 50%)及 IPAP 为 10、20 cmH_2O 时,两组组内及组间面罩内 FiO_2 比较差异均无统计学意义。说明 TCCL 面罩能达到显著降低面罩内 $PetCO_2$ 而不影响吸入气体 FiO_2 的设计要求。主要理论依据是 TCCL 面罩采用平台型呼气阀设计,可利用平台型呼气阀的变形膜片根据呼吸回路压力波动而动态控制泄气孔大小维持泄气量相对恒定。我们前期已通过 NPPV 实验模型证实:平台型呼气阀随 IPAP 压力增高而泄气量基本维持不变,而常用的单孔型呼气阀泄气量随 IPAP 压力增高而增加[13]。因此,TCCL 面罩可确保在不影响面罩内吸入气体 FiO_2 情况下解决面罩内死腔效应问题。

现有 NPPV 面罩内存在显著死腔效应,易致 CO_2 重复呼吸而影响患者 CO_2 潴留纠正。我们研制的 TCCL 面罩实现利于解决面罩内死腔效应的呼气阀位置优化和优势呼气阀类型的技术集成,具有双通道通气和相对恒定泄气量的功能特点。通过健康人进行 TCCL 面罩和普通型 NPPV 面罩的对照研究,初步研究结果表明 TCCL 面罩能达到显著降低面罩内 $PetCO_2$ 而不影响吸入气体 FiO_2 的设计要求。有关 TCCL 面罩应用效果的研究尚存在一定局限性,需增加呼吸机参数变量和临床应用研究进一步验证其治疗效果。

综上所述,TCCL 面罩有助于减少面罩内死腔气体量及解决 CO_2 重复呼吸而不影响吸入气体 FiO_2,有望为 NPPV 治疗中纠正患者 CO_2 潴留提供新思路和新方法,预期该面罩具有良好的临床价值和市场前景。

参考文献:

[1] ZHU J J, LIU L J. Analysis of factors influenced by the effectiveness of non-invasive ventilation in the treatment of acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease with different severities[J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2016, 20(22): 4775-4781.

[2] 向军, 黄桃. PHILIPS V60 呼吸机治疗慢性阻塞性肺疾病的临床疗效分析[J]. 医疗卫生装备, 2015, 36(4): 75-77.
XIANG J, HUANG T. Analysis of clinical effect of PHILIPS V60 ventilator in treatment of patients with chronic obstructive pulmonary disease[J]. Chin Med Equip J, 2015, 36(4): 75-77.

[3] SCHETTINO G P, CHATMONGKOLCHART S, HESS D R, *et al*. Position of exhalation port and mask design affect CO_2 rebreathing during noninvasive positive pressure ventilation [J]. Crit Care Med, 2003, 31(8): 2178-2182. DOI:10.1097/01.CCM.0000081309.71887.E9.

[4] 宋宁燕, 徐劲松, 夏国际, 等. AECOPD 合并Ⅱ型呼吸衰竭无创正压通气治疗早期失败的预警因素分析[J]. 临床

肺科杂志, 2011, 16(10): 1529-1531.
SONG N Y, XU J S, XIA G J, *et al*. The early failure predictive factors of BIPAP in AECOPD combined with type Ⅱ respiratory failure[J]. J Clin Pulm Med, 2011, 16(10): 1529-1531.

[5] 王梅, 廖浩, 裴文迪, 等. 长期无创正压通气治疗重度稳定期慢性阻塞性肺疾病合并呼吸衰竭的效果评价: 一项随机对照试验的 Meta 分析[J]. 中国呼吸与危重监护杂志, 2018, 17(3): 223-229.
WANG M, LIAO H, PEI W D, *et al*. The efficacy of noninvasive positive pressure ventilation on severe stable chronic obstructive pulmonary disease with respiratory failure patients: a meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Chin J Respir Crit Care Med, 2018, 17(3): 223-229.

[6] 彭渤, 王东, 张波, 等. 无创正压通气治疗时不同呼气阀对二氧化碳重复呼吸的影响[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2005, 28(12): 875-876.
PENG B, WANG D, ZHANG B, *et al*. Effect of different exhalation valves on repeated respiration of carbon dioxide during noninvasive positive pressure ventilation[J]. Chin J Tuberc Respir Dis, 2005, 28(12): 875-876.

[7] 黄桃, 周发春, 万东, 等. 使用 BiPAPVision 呼吸机单孔型和平台型呼气阀治疗慢性阻塞性肺疾病合并高碳酸血症[J]. 中国危重病急救医学, 2011(4): 216-219.
HUANG T, ZHOU F C, WAN D, *et al*. Difference between single hole exhalation valve and plateau exhalation valve when used in patients treated with BiPAP Vision ventilator for chronic obstructive pulmonary disease with hypercapnia[J]. Chin Crit Care Med, 2011(4): 216-219.

[8] MEDIANO O, GARCÍA-RÍO F, VILLASANTE C. Comparison of carbon dioxide rebreathing during application of continuous positive airway pressure with 3 types of nasal mask[J]. Arch Bronconeumol, 2006, 42(4): 189-193.

[9] STELL I M, PAUL G, LEE K C, *et al*. Noninvasive ventilator triggering in chronic obstructive pulmonary disease. A test lung comparison[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2001, 164(11): 2092-2097. DOI: 10.1164/ajrccm.164.11.2011147.

[10] LOFASO F, BROCHARD L, TOUCHARD D, *et al*. Evaluation of carbon dioxide rebreathing during pressure support ventilation with airway management system (BiPAP) devices[J]. Chest, 1995, 108(3): 772-778. DOI: 10.1378/chest.108.3.772.

[11] FERGUSON G T, GILMARTIN M. CO_2 rebreathing during BiPAP ventilatory assistance[J]. Am J Respir Crit Care Med, 1995, 151(4): 1126-1135. DOI: 10.1164/ajrccm.151.4.7697242.

[12] LOFASO F, BROCHARD L, HANG T, *et al*. Home versus intensive care pressure support devices. Experimental and clinical comparison[J]. Am J Respir Crit Care Med, 1996, 153(5): 1591-1599. DOI: 10.1164/ajrccm.153.5.8630607.

[13] 黄桃, 王华, 谭继翔. 无创正压通气应用中呼气阀安装位置及类型对 CO_2 重复呼吸影响的实验研究[J]. 中华危重病急救医学, 2015(10): 791-795.
HUANG T, WANG H, TAN J X. Effect of location and type of exhalation valve on carbon dioxide rebreathing during noninvasive positive pressure ventilation: a experimental study[J]. Chin Crit Care Med, 2015(10): 791-795.

[14] 李振潇, 张翼飞, 张治国. 全脸式睡眠呼吸机面罩内 CO_2 残留的数值分析及优化设计[J]. 生物医学工程研究, 2018, 37(3): 297-302, 308.
LI Z X, ZHANG Y F, ZHANG Z G. Residue state numerical simulation of the CO_2 in whole-face sleep respirator mask and its optimal design[J]. J Blomed Eng Res, 2018, 37(3): 297-302, 308.

[15] ZHANG Z G, LI Z X, ZHANG Y F, *et al*. Individualized design of the ventilator mask based on the residual concentration of CO_2[J]. Comput Model Eng Sci, 2018, 117(2): 157-167. DOI: 10.31614/cmes.2018.04067.

(**收稿**: 2019-05-05; **修回**: 2019-07-08)
(编辑 邓强庭)