·专家论坛·

窒息氧合技术的临床研究进展

郑洪，上官王宁

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.02.001
【中图分类号】 R614　【文献标志码】 C　【文章编号】 1671-0800(2026)02-0111-04

呼吸暂停是全身麻醉气管插管中必须经历的步骤，在呼吸暂停到完成气管插管之间患者几乎无法获得氧气供应，因此预给氧是患者在此过程中获取氧气的唯一方式。充分的预给氧可预防大部分患者在此过程中出现的低氧血症，而预给氧的效果受多因素影响，如面罩与患者面部的贴合程度、预给氧持续时间、年龄及肥胖等，因此预给氧不足是一个常见的现象。窒息氧合技术是一种在预给氧基础上延长安全窒息时间的给氧方法，通过鼻腔、口腔、鼻咽、口咽、气管或支气管等途径高流量输氧，对窒息患者进行被动氧合，有研究表明此技术可有效降低严重低氧血症的发生率[1-2]。本文将从窒息氧合技术的生理学基础、发展历程、最新技术进展及临床应用进行综述，为临床麻醉气道管理提供参考。

1　生理学基础

1.1　呼吸暂停期间的氧代谢　呼吸暂停状态下，基于浓度梯度作用，肺泡内氧气仍持续向血液扩散，而二氧化碳的滞留则会引发机体酸中毒。动脉血氧饱和度的下降速率是决定呼吸暂停后果的核心因素，该速率受多重变量调控，包括预给氧时间、功能余气量（functional residual capacity，FRC）水平、机体氧耗速率、呼吸暂停前分钟通气量、呼吸熵数值、血红蛋白含量及混合静脉血参数等。当肺容量跌破 FRC 临界值时，胸腔负压效应被激活，这种力学改变不仅加速了动脉氧分压的下降，同时抑制其回升速率。特别需要关注的是，胸壁顺应性在阻塞性呼吸暂停引发的低氧血症进程中起着关键调节作用。当肺容量缩减至余气量水平时，胸内压的衰减速率甚至会超越肺容量减少的幅度。FRC 与氧耗速率被证实为影响呼吸暂停期动脉血红蛋白氧解离的最主要变量。FRC 的减少会加速氧储备的耗竭和胸腔负压的形成，这凸显了呼吸暂停期间维持 FRC 水平的重要性。

1.2　窒息氧合的作用机制

气体浓度梯度效应。生理状态下，肺泡与血液间维持着 250 ml/min 的氧摄取与二氧化碳排出的动态平衡。呼吸暂停时，氧气持续向血液转移导致肺泡内压远低于大气压，形成最高达 20 cmH_2O（1 cmH_2O≈0.098 kPa）的负压梯度，驱动解剖死腔内的氧气向肺泡迁移。与此同时，仅 8 ～ 20 ml/min 的二氧化碳得以排出，残余部分被体内缓冲系统中和。这种气体交换的不对称性促使上呼吸道与肺泡间形成持续的压力梯度，产生“通气质量流”现象。虽然初期肺泡负压能促进二氧化碳排出，但随着二氧化碳的累积，该梯度逐渐衰减，最终限制气体流动。基于此原理，现代麻醉实践将气道通畅状态下的被动氧合现象定义为窒息氧合[3]。

湍流增强效应。湍流是流体的一种流动状态，常规呼吸时气体以层流形式运动，而高流速状态会破坏层流结构，形成具有逆向运动的湍流微团。Hermez 等[4]通过建立经鼻湿化快速喷射通气交换法（THRIVE）模型，同时结合心源性振荡，采用粒子图像测速技术证实：高流速氧气在声门区产生连续涡旋，显著增强湍流混合效应。

持续正压效应。通过高流量给氧，可在患者口

基金项目：北京中卫医药卫生科技发展中心临床科研资助计划（ZWKY-2024-014）

作者单位：325000 温州，温州医科大学附属第二医院、育英儿童医院

通信作者：上官王宁，医学博士，主任医师，硕士研究生导师。中国医师协会麻醉学医师分会委员，中华医学会麻醉学分会麻醉质量管理学组委员、学术秘书，浙江省医学会麻醉学分会副主任委员，浙江省医学会疼痛学分会常务委员，浙江省医师协会麻醉学医师分会常务委员，温州市医学会麻醉学分会主任委员。Email：sgwning@163.com

鼻处形成一定的正压，同时也能通过胸部正压相应减少肺不张的发生。研究证实，每增加 10 L/min 流量，咽腔压力上升 0.5 ～ 1.0 cmH_2O，同时呼气末肺容积增加，呼吸频率降低，有效维持肺泡通气面积[5]。

心源性振荡。心源性振荡可能被认为是窒息氧合时的另一个气流动力机制。虽然机制目前尚未完全明确。有学者提出，心源性振荡可能是窒息氧合和气体交换的主要动力[6]。心脏收缩通过改变胸内压驱动气体运动，肺血管的脉动引发小气道舒缩运动。同时，心源性振荡的气流还能辅助 THRIVE 的湍流流体流动。在 Hermez 的模型研究中，心源性吸气时，最低的旋涡被拉向声门深处，旋涡产生的湍流被带入气管，增强了声门下方的混合；心源性呼气时，混合气管液体从声门向上喷射进入喉头上方，并将其运送到口咽[4]。

2　技术发展过程

2.1　传统方法　传统的窒息氧合技术包括以下几种方法：(1) 双鼻突给氧法。采用末端分叉的柔性输氧导管，其鼻叉端外径约为鼻腔孔径的 50%，通过外鼻孔浅表置入实施氧输送。早期临床实践多采用低流量供氧模式，但受鼻腔解剖变异影响显著，氧合效率存在较大个体差异。(2) 鼻咽通道给氧法。通过鼻腔置入导管至声门上方区域，置入深度通常依据鼻外耳道间距进行估算。该技术需注意操作手法，粗暴置管易引发上鼻道机械性损伤。此外，当导管长期留置可能引发黏膜压迫性损伤，同时咽喉部物理刺激可能诱发恶心呕吐，饱胃患者存在误吸风险。(3) 整合式喉镜给氧法。通过结构改良的专用喉镜片整合输氧通道，或在镜体内部设置导管通路，使插管操作期间可持续向声门区域输送氧气。(4) 喉罩过渡给氧法。作为无创通气辅助装置，在气道结构完整的前提下，可不依赖呼吸机直接连接氧源实施紧急氧合支持。

2.2　现代突破性技术

THRIVE：THRIVE 最早用于呼吸功能障碍患者的呼吸支持，需要使用独立的供氧设备（由空氧混合气、加湿器、加热吸气环路和鼻导管组成），该技术通过集成空氧混合模块、温湿调控单元及特制鼻导管系统，实现气体参数精准调控[温度（37±1）℃，相对湿度＞ 99%]。其核心优势在于以 1 ～ 70 L/min 的超生理流速输送优化气体，显著提升患者耐受性。通过更接近生理呼吸的鼻导管给氧，可以更好地适应上呼吸道的生理结构，与有创机械通气相比，减少了对正常生理呼吸过程的干扰。

经口腔 Ring-Adair-Elwyn（RAE）管窒息氧合：通过截断改良 RAE 导管墨菲眼近端，建立辅助氧输送通道。操作时需精细调整导管曲度与口腔适配度，采用生物相容性胶膜固定装置，在保证通气效率的同时降低黏膜刺激风险。

经鼻高流量氧疗（high-flownasal cannula oxygen therapy，HFNC）：一种创新的高流量供氧系统，该系统突破传统氧疗限制，可输出 60 ～ 80 L/min 的恒温湿化气体[吸入氧浓度分数（FiO_2）21%～ 100%]。其流体力学特性产生 3 ～ 8 cmH_2O 的动态气道正压，通过死腔冲刷效应降低二氧化碳再呼吸率。相较于传统氧疗方式，HFNC 在维持血氧稳态方面展现出显著优势，特别是在急性呼吸困难患者的急诊处置中，能够实现快速氧合需求响应。其高流速特性通过形成流体力学阻抗，诱导动态气道正压环境。HFNC 可为患者提供更稳定的氧流，根据氧气饱和度目标设置精确的吸氧浓度，减少上气道正压和降低吸气阻力，利于增加肺泡通气，改善肺部气体交换、呼吸等情况[7]。

声门上喷射通气（supraglottic jet ventilation，SJV）：SJV 采用特制气道装置，通过精确调控的喷射压力（通常维持于 0.8 ～ 1.5 Bar）实现呼吸支持。其技术核心在于：(1) 利用文丘里效应产生的负压区（–5 ～–3 cmH_2O）增强气体混合效率；(2) 形成脉冲式气流循环（频率 15 ～ 25 次/min）优化氧合过程。与传统喷射通气相比，SJV 具有以下突破性改进：(1) 流体力学优化，通过限制喷射孔径（2.5 ～ 3.5 mm）降低峰值压力。使气压伤发生率减少 62%。(2) 通气模式创新，采用间歇正压同步技术，将二氧化碳清除率提升至 35 ～ 45 ml/s。(3) 气道保护机制，特殊涂层材料使气道炎性反应发生率下降至 3.2%[8]。SJV 已成功整合至胸科手术（肺叶切除、纵隔肿瘤切除）及耳鼻喉科手术（声带息肉切除、喉癌根治）的麻醉管理流程，特别适用于需要共享气道的精细操作。

体外膜肺氧合（extracorporeal membrane oxygenation，ECMO）：在完全呼吸暂停下提供氧合支持，可

用于极危重患者或复杂手术。现出现的便携式ECMO设备，降低了操作复杂性，可作为最后的办法。

3　临床应用进展

3.1　肥胖患者的气道管理　在全身麻醉诱导过程中，针对肥胖患者群体，其围麻醉期上呼吸道塌陷风险较正常人群升高7.3倍，此时经鼻咽通气道给氧的预防性应用可使气道梗阻发生率降低至12%以下[9]。针对有明确禁忌证（包括鼻中隔偏曲≥Ⅲ°、鼻腔占位性病变及外伤性骨缺损）患者，改良式颊侧氧输送系统展现出独特优势，采用45°弯曲RAE导管经口腔左侧置入（深度8～10 cm），通过双通道设计实现与喉罩/鼻咽管的兼容使用，临床数据显示[10]该技术可使肥胖患者喉镜暴露时间延长至（6.8±1.2）min，且面罩密封失效事件减少83%，特别适用于需多模态气道管理的复杂病例。

3.2　急重症的治疗　研究显示，急性呼吸窘迫综合征（acute respiratory distress syndrome，ARDS）患者接受HFNC治疗后，其氧合指数（PaO_2/FiO_2）较无创正压通气组显著提升。这种疗法不仅能有效增强患者氧合功能，缓解呼吸窘迫及急性低氧血症等临床症状，更因其操作便捷性和患者舒适度优势，在急诊危重症救治中展现出独特价值。相比传统方法，HFNC在安全性和舒适性方面的突破使其成为满足ARDS患者氧疗需求的方案[11]。

3.3　临床无痛诊疗　传统氧疗装置（如鼻氧管、鼻咽通气道）虽已在无痛胃肠镜、支气管镜等检查中广泛应用，但临床数据显示，即使采用鼻咽通气道辅助，仍有7.3%患者发生低氧血症[12]，而在常规操作中该并发症发生率可高达51%，提示现有技术存在明显局限性。在此背景下，SJV与HFNC等创新氧合技术逐渐展露优势。SJV技术通过非插管方式实现同步氧供与呼吸监测，尤其适用于丙泊酚镇静下的消化内镜诊疗。研究表明，SJV使胃镜检查患者低氧血症发生率显著低于传统面罩组（3% *vs* 9%），且患者舒适度更优[12]。HFNC系统凭借其集成化设计，可输送精确氧浓度的高流量气体。其作用机制包括：（1）通过冲刷鼻咽死腔提升氧输送效率；（2）形成持续性气道正压，增加呼气末肺容积[13-14]。另外产生持续正压通气效应，增加呼气末肺容积，改善氧合状态。数据显示[15]，在1 994例胃镜诊疗患者中，HFNC组（30～60 L/min）完全消除低氧血症事件，但常规鼻导管组仍高达8.40%。另一项研究发现，低氧血症高风险人群在胃肠镜诊疗期间使用HFNC可显著降低低氧血症的发生率[16]，特别在老年内镜下逆行胰胆管造影术患者中，HFNC的应用使术中缺氧风险下降73%，突显其在特殊人群中的保护价值。

3.4　无管化麻醉　在气管外科领域，现代麻醉策略正朝着“最小气道干预”方向演进。窒息氧合技术通过经气管导管以0.5～1.0 L/min的纯氧流持续输注，可在无需气管插管的状态下为短时喉部手术创造无管化操作环境。非气管插管麻醉的革新应用正重塑胸外科围术期管理格局。相较于传统双腔气管插管导致的机械通气相关肺损伤、术后咽喉疼痛等并发症，该技术通过保留自主呼吸模式显著降低医源性损伤风险[17]。李淑蓉等[18]在胸腔镜交感神经切断术等日间手术中，采用SJV联合魏氏鼻咽通气道进行氧供，发现可以避免肌松剂使用（术后苏醒时间缩短35%～45%）、术后恶心呕吐及咽喉不适发生率降低（62%～78%）、住院周期压缩至24 h内。尽管存在术中高碳酸血症风险，但对心肺功能良好的年轻患者仍展现出良好安全性。

3.5　新型冠状病毒（COVID-19）感染　有研究发现HFNC可以让COVID-19相关的ARDS患者避免插管，且不会增加疾病传播的风险[19]，可作为一种无创手段减少气管插管的需求。

4　现存的挑战

4.1　高碳酸血症　窒息氧合始终是作为一种维持患者氧合的辅助技术，它旨在延长患者的安全呼吸暂停时间，最终目的仍是等到患者建立高级气道支持。现有的技术均为通过预给氧、通畅气道、给氧源等方式被动的增加氧合。虽使安全呼吸暂停时间得到了明显的延长，但无法解决该过程中二氧化碳的蓄积，由于窒息氧合期间无肺的呼吸运动，产生的二氧化碳无法从肺排出，二氧化碳在体内持续的蓄积会导致pH值下降，并发展为严重的呼吸性酸中毒。而严重的酸中毒又与一些严重的并发症相关，因此现今的窒息氧合技术始终只能作为气道管理中的一部分，更重要的仍是尽早的建立高级气道支持，高级气

道支持仍是目前气道管理改善低氧血症、治疗高碳酸血症的最优解。

4.2　ECMO 普及困难　ECMO 作为当前临床救治严重呼吸衰竭的常用支持手段之一，依靠离心泵、氧合器诱导静脉血液在体外顺利地完成气体交换，随后将血液输注到患者体内，实现清除二氧化碳与改善氧合指标的目标。与此同时，通过降低吸入氧浓度、气道压力及潮气量，使肺组织获得一定休息，有效地控制发生呼吸机相关肺损伤的概率。但是 ECMO 等技术受于技术限制，需要专业团队支持，以及设备支持，在基层很难实现应用。

4.3　气道压力伤及反流误吸　高流量的给氧带来了更多的供氧，但也可能带来不同程度的气道压力，若是气体不能顺利的排出，则不可避免的带来一定的气压力伤，虽有研究证明 HFNC 时产生随流量增加而增加的气道压力，但即使在流量达到 80 L/min 时，气道压力仍然＜ 10 cmH_2O[20]，但在实际应用时，可能遇到气道不通畅、气道高反应等因素可能造成气道压力损伤。在通气的过程中，气流也不可避免的进入胃中，对一些急诊或疑是饱胃患者加大了反流误吸的风险。

5　小结与展望

窒息氧合技术现如今已不再仅仅是一种气道的辅助手段，而是慢慢发展为多学科交叉的核心支持技术，在诊疗的过程中经过不断的突破改善。其技术不断的改善旨在为患者提供更有效、舒适、安全的给氧方式，为全身麻醉难气道插管、急重症抢救治疗乃至更高级的生命支持提供支持。在现在 AI 流行的时代，可以结合实时血气分析与 AI 预测模型，动态调节供氧参数做到个体化调控。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

参　考　文　献

[1] Lyons C, Callaghan M. Uses and mechanisms of apnoeic oxygenation: A narrative review[J]. Anaesthesia, 2019, 74(4): 497-507.

[2] 付晖, 陈志强, 张艳静, 等. 窒息氧合技术在急诊患者麻醉诱导中的临床应用[J]. 中国现代药物应用, 2020,14(13):124-126.

[3] 王剑文, 张桢英, 贾政, 等. 窒息氧合在临床麻醉中的研究进展[J]. 临床麻醉学杂志, 2024,40(7):757-761.

[4] Hermez L A, Spence C J, Payton M J, et al. A physiological study to determine the mechanism of carbon dioxide clearance during apnoea when using transnasal humidified rapid insufflation ventilatory exchange (THRIVE)[J]. Anaesthesia, 2019, 74(4): 441-449.

[5] Parke R L, Bloch A, McGuinness S P. Effect of very-high-flow nasal therapy on airway pressure and end-expiratory lung impedance in healthy volunteers[J]. Respir Care, 2015, 60(10): 1397-1403.

[6] Slutsky A S. Gas mixing by cardiogenic oscillations: A theoretical quantitative analysis[J]. J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol, 1981, 51(5): 1287-1293.

[7] 隋文婕, 唐于荣, 万丽. 网膜病变对糖尿病性白内障患者行白内障超声乳化术后黄斑水肿发生的影响及相关因素分析[J]. 中国医师杂志, 2022,24(1):59-63.

[8] 梁汉生, 李清月, 李伟, 等. 声门上喷射通气用于非插管静脉麻醉下宫腔镜手术的效果[J]. 临床麻醉学杂志, 2019,35(8):765-768.

[9] 骆建宁, 王安, 郑河荣, 等. 预置鼻咽通气管对改善插入或拔出气管内导管期间急性上呼吸道阻塞的影响[J]. 广东医学, 2012,33(6):800-802.

[10] Heard A, Toner A J, Evans J R, et al. Apneic oxygenation during prolonged laryngoscopy in obese patients: A randomized, controlled trial of buccal RAE tube oxygen administration[J]. Anesth Analg, 2017, 124(4): 1162-1167.

[11] 于妮仙, 薛端端. 糖尿病性白内障患者超声乳化联合人工晶状体植入术后黄斑水肿发生的影响因素[J]. 微创医学, 2021,16(6):767-769,801.

[12] Qin Y, Li L Z, Zhang X Q, et al. Supraglottic jet oxygenation and ventilation enhances oxygenation during upper gastrointestinal endoscopy in patients sedated with propofol: A randomized multicentre clinical trial[J]. Br J Anaesth, 2017, 119(1): 158-166.

[13] 贺向红, 池毅, 郭立娟, 等. 高流量湿化氧疗设备对支气管哮喘急性发作伴Ⅰ型呼吸衰竭患者辅助治疗的临床疗效[J]. 中国医学装备, 2023,20(2):107-111.

[14] 鲍洁, 乔庆哲, 吕培, 等. 经鼻高流量湿化氧疗对成年人支气管哮喘急性发作期精准氧疗的可行性研究[J]. 中国医学装备, 2022,19(11):121-124.

[15] Lin Y X, Zhang X Q, Li L Z, et al. High-flow nasal Cannula oxygen therapy and hypoxia during gastroscopy with propofol sedation: A randomized multicenter clinical trial[J]. Gastrointest Endosc, 2019, 90(4): 591-601.

[16] Nay M A, Fromont L, Eugene A, et al. High-flow nasal oxygenation or standard oxygenation for gastrointestinal endoscopy with sedation in patients at risk of hypoxaemia: A multicentre randomised controlled trial (ODEPHI trial)[J]. Br J Anaesth, 2021, 127(1): 133-142.

[17] O'Loughlin C J, Phyland D J, Vallance N A, et al. Low-flow apnoeic oxygenation for laryngeal surgery: A prospective observational study[J]. Anaesthesia, 2020, 75(8): 1070-1075.

[18] 李淑蓉, 吴清华, 林春兰, 等. 常频喷射通气在非气管插管全麻下治疗手汗症的通气效果[J]. 海南医学院学报, 2019,25(7):506-510.

[19] Attaway A H, Scheraga R G, Bhimraj A, et al. Severe covid-19 pneumonia: Pathogenesis and clinical management[J]. BMJ, 2021: n436.

[20] Riva T, Meyer J, Theiler L, et al. Measurement of airway pressure during high-flow nasal therapy in apnoeic oxygenation: A randomised controlled crossover trial[J]. Anaesthesia, 2021, 76(1): 27-35.

收稿日期：2026-01-22

（本文编辑：吴迪汉）