

基于海姆立克急救原理的气道异物梗阻自救装置构型设计与压力控制策略研究进展

张鑫¹ 宋林锴² 任宜佳³ 叶佳昊² 李金哲^{4*}

1. 宁夏医科大学检验学院, 中国·宁夏 银川 750004

2. 宁夏医科大学第一临床医学院, 中国·宁夏 银川 750004

3. 宁夏医科大学第二临床医学院, 中国·宁夏 银川 750004

4. 宁夏医科大学口腔医学院, 中国·宁夏 银川 750004

摘要: 气道异物梗阻起病突然, 严重时可在短时间内引起窒息、缺氧性脑损伤甚至死亡。腹部冲击能够通过升高腹腔和胸腔压力形成瞬时呼气气流, 是清醒成人严重气道异物梗阻的重要急救方法。但传统腹部冲击通常依赖他人实施, 独处患者自行握拳或借助椅背自救时, 容易受到施力位置、方向、强度及身体状态影响。机械自救装置可将人工腹部冲击转化为可重复的机械脉冲, 但其临床价值取决于定位固定、执行机构、接触结构、压力控制和安全终止等环节。本文综述气道异物梗阻的急救现状、腹部冲击的作用机制、自救装置研究进展及主要构型, 分析力、位移和脉冲节律的控制方法, 并结合自适应腹压脉冲装置讨论其应用场景、效果评价和证据局限, 为相关设备的设计与临床前验证提供参考。

关键词: 气道异物梗阻; 海姆立克急救法; 腹部冲击; 自救装置

Advances in the Structural Design and Pressure-Control Strategies of Self-Rescue Devices for Foreign-Body Airway Obstruction Based on the Abdominal Thrust Maneuver

Zhang Xin¹, Song Linkai², Ren Yijia³, Ye Jiahao², Li Jinzhe^{4*}

1. School of Laboratory Medicine, Ningxia Medical University, China Ningxia Yinchuan 750004

2. First Clinical Medical College, Ningxia Medical University, China Ningxia Yinchuan 750004

3. Second Clinical Medical College, Ningxia Medical University, China Ningxia Yinchuan 750004

4. School of Stomatology, Ningxia Medical University, China Ningxia Yinchuan 750004

Abstract: Foreign-body airway obstruction has a sudden onset and, in severe cases, may rapidly result in asphyxia, hypoxic brain injury, or even death. The abdominal thrust maneuver generates a transient expiratory airflow by increasing intra-abdominal and intrathoracic pressures and is an important first-aid intervention for severe foreign-body airway obstruction in conscious adults. However, conventional abdominal thrusts usually depend on assistance from another person. When individuals are alone, the effectiveness of self-administered thrusts using the fists or a chair back may be affected by the site, direction, and magnitude of force application, as well as by the patient's physical condition. Mechanical self-rescue devices can convert manual abdominal thrusts into reproducible mechanical pulses, but their clinical value depends on several factors, including positioning and fixation, actuation mechanisms, contact structure, pressure-control strategies, and safety termination mechanisms. This review summarizes the current emergency management of foreign-body airway obstruction, the mechanisms of abdominal thrusts, recent advances in self-rescue devices, and their major structural configurations. It further analyzes control strategies involving force, displacement, and pulse rhythm, and discusses the potential application scenarios, effectiveness evaluation, and limitations of the available evidence for adaptive abdominal-pressure pulse devices. This review may provide a reference for the design and preclinical validation of related devices.

Keywords: Foreign-body airway obstruction; Abdominal thrust maneuver; Mechanical abdominal thrust; Self-rescue device

0 引言

气道异物梗阻是由食物或其他物体阻断气流所致的急症,患者可在数分钟内由呼吸困难进展为意识丧失和心搏骤停。儿童和老年人是主要高风险人群,吞咽功能下降、神经系统疾病、咀嚼能力不足及进食状态异常也会增加发生风险。解除梗阻的时间与患者神经功能及生存结局密切相关,现场识别和早期干预十分重要^[1-2]。

现行急救措施包括鼓励有效咳嗽、背部叩击、腹部冲击、胸部冲击以及意识丧失后的心肺复苏^[3-4]。其中,腹部冲击主要用于仍有反应的成人和较大儿童。该方法操作直接,但其效果受施救者力量、动作方向、施力位置和操作熟练程度影响。独处患者虽然可以自行实施腹部冲击,也可借助椅背或桌缘完成自救,但紧张、缺氧和动作协调下降可能使操作难以达到预期效果。机械辅助装置为腹部冲击的标准化提供了新的思路,但现阶段尚缺少统一构型、压力参数和评价标准。本文围绕自救装置的构型设计和压力控制进行综述,并对其应用与证据边界进行分析。

1 气道异物梗阻的急救现状

气道异物梗阻是食物或其他物体进入上呼吸道后,部分或完全阻断气流通过的一种危急重症。全球疾病负担研究显示,气道异物吸入的发病和死亡风险具有年龄差异,5岁以下儿童的发病负担较高,70岁及以上人群的死亡负担更为突出^[1]。多中心观察研究发现,梗阻持续时间延长与死亡或严重神经功能损害相关,提示尽早识别并解除异物是改善预后的关键^[2]。

根据气流受限程度,患者可表现为不完全性梗阻或严重梗阻。不完全性梗阻患者通常仍能说话、呼吸或用力咳嗽,应鼓励其持续自主咳嗽,并观察症状变化。严重梗阻时可出现无声咳嗽、不能说话、呼吸困难、吸气性喘鸣、口唇发绀及意识改变。双手抓颈是较典型的窒息动作,但并非所有患者都会出现,判断时还需结合发声、咳嗽和气流情况。

2025年美国心脏协会成人基础生命支持指南建议,对仍有反应的成人严重气道异物梗阻患者,应启动紧急医疗救援,并交替实施5次背部叩击和5次腹部冲击,直至异物排出或患者失去反应^[3]。对于1岁以上儿童,可交替实施背部叩击和腹部冲击。婴儿应采用背部叩击和胸部冲击,不实施腹部冲击^[4]。患者失去反应后,应立即开始心肺复苏,仅在异物清晰可见时将其取出,不宜盲目进行手指探查。

当梗阻发生于独处状态时,患者可自行握拳冲击上腹部,也可将上腹部抵住椅背、桌缘或扶手,通过身体前倾

形成冲击。健康受试者研究显示,自行腹部冲击能够使压力由腹部向胸腔传递,借助椅背冲击时产生的食管内压力可高于徒手自我冲击和他人实施的传统腹部冲击^[5]。这说明固定支撑具有一定生物力学可行性,但该研究未建立真实气道梗阻,不能据此确定其临床成功率和安全性。

传统自救无需专用设备,但受患者体力、上肢力量、操作姿势和紧急状态下认知能力影响。严重梗阻患者可能因恐惧和缺氧难以准确定位并连续冲击。借助坚硬物体时,接触面积过小还可能造成局部压力集中。因此,自救装置主要适用于仍保持意识、能够识别窒息状态并自主启动设备的患者,其作用应定位为标准急救流程的补充,而非替代紧急呼救和规范急救。

2 海姆立克急救法的作用机制与影响因素

海姆立克急救法的核心是对脐上、剑突下方的上腹部实施快速冲击,使腹腔压力升高并推动膈肌向上移动。胸腔容积随之减小,肺内及气道压力升高,形成朝向口腔的瞬时呼气气流,从而促进异物松动或排出^[5]。腹部冲击并非直接接触异物,而是通过外部机械作用形成类似咳嗽的排异效应。

正常咳嗽包括吸气、声门关闭、呼气肌收缩和声门开放等过程。严重气道异物梗阻时,患者难以完成有效咳嗽。腹部冲击通过快速提高胸腔压力,部分替代呼气肌主动收缩的作用。早期模型研究从惯性力和空气动力角度解释了腹部冲击与背部叩击促进异物移动的可能机制^[7]。需要注意的是,外部作用力、腹壁接触压强、腹腔压力、胸腔压力和气道气流并非同一参数。作用力需经过腹壁、腹腔内容物和膈肌逐级传递,每个环节都可能受到人体组织特征影响。

腹部冲击效果与施力位置、接触面积及动作方向密切相关。位置过高可能直接作用于剑突、胸骨下端或肋弓,增加骨性结构和邻近组织损伤风险。位置过低则可能削弱压力向膈肌传递。接触面积过小容易产生较高局部压强,面积过大又可能使冲击力过度分散。机械装置需要在有效传递作用力和减少局部压力集中之间取得平衡。

冲击效果也不能仅用峰值作用力评价。按压位移、推进速度、压力上升时间、峰值持续时间、回缩速度和冲击次数,均会影响最终形成的压力脉冲。持续而缓慢的挤压未必能够形成足够的瞬时气流,作用力过大、推进过深或冲击次数过多又可能增加组织损伤风险。系统评价显示,腹部冲击、背部叩击和胸部冲击均有解除梗阻的病例证据,但现有研究以观察性研究和病例报告为主,尚未形成统一的最佳力学参数^[6]。

年龄、腹壁厚度、肌肉紧张程度、胸腹顺应性、患者体位和肺内气量也会影响压力传递。异物的大小、形状、材质、嵌顿位置及与气道壁的接触状态,则会改变其受到的压力差和移动阻力^[7]。目前尚不能仅依据年龄、体重或腰围直接确定最佳冲击强度。

腹部冲击虽然具有重要急救价值,但已有胃肠道、肝脾、膈肌和血管损伤等并发症报道^[6,8]。这些证据多来自病例报告,不能据此否定腹部冲击的急救作用,但提示机械装置不应单纯追求更高输出,而应同步限制力、位移、速度和连续冲击次数。

3 气道异物梗阻自救装置的研究现状

气道异物梗阻自救装置主要用于患者独处,或现场人员无法及时实施规范急救的情况。按照作用原理,现有装置可分为机械腹部冲击式和负压吸引式两类。前者以腹部冲击为基础,通过提高胸腔和胸腔压力产生呼气气流。后者则通过口鼻面罩或导管建立负压,使异物受到朝向口腔的压力差。

机械腹部冲击装置来源于徒手腹部冲击和借助椅背自救的方法。固定支撑有助于将身体运动转化为胸腔压力^[5]。在此基础上,相关装置逐渐形成手持式、支撑式和穿戴式构型。手持式装置结构简单,但需要患者自行定位和固定。支撑式装置利用墙体或支架承担反作用力,但便携性有限。穿戴式装置可通过腰带或环抱结构固定施压模块,并集成执行机构和传感器,有利于重复冲击和参数控制,但仍需解决穿戴时间、体型适配和紧急解除问题。目前机械腹部冲击装置多处于设计和模型验证阶段,缺少高质量临床研究^[6]。

负压吸引式装置通常由面罩、单向阀和活塞或风箱结构组成。使用时通过抽拉形成负压,将异物向口腔方向吸引。该类装置不直接压迫腹部,但其效果受到面罩密封、负压水平、异物位置及气道密闭程度影响。Patterson 等^[9]在 90 名参与者中开展随机交叉模拟人试验,结果显示一种负压装置的异物清除成功率高于腹部冲击,另一种装置则未表现出明显优势,说明不同结构和操作方式可产生不同结果。

Dunne 等^[10]回顾性分析了 185 例负压装置使用记录,多数病例报告梗阻症状在使用后缓解。但部分患者在装置使用前或同时接受背部叩击和腹部冲击,资料又主要来自使用者主动报告和制造商数据库,存在病例选择、漏报及结局判断偏倚。其结果只能提示装置具有潜在价值,不能证明其优于标准急救方法。

尸体研究进一步显示,不同装置对不同模拟异物的清

除效果有限,其中一种装置在试验中未能清除异物,并出现舌部明显损伤。另一种装置仅成功清除特定性状的模拟食物,两种装置均对口腔组织产生较大压力^[11]。该结果与部分模拟人研究并不一致,说明异物材质、嵌顿深度、气道模型和密封条件都会影响试验结果。

总体而言,现有证据主要来自模拟人、尸体模型、病例登记和回顾性资料。模拟人不能完整反映人体胸腹顺应性和气道组织特点,尸体模型缺少活体组织张力和生理反应,实际使用记录又容易受到联合急救措施影响。因此,目前尚不能确定某一类装置具有明确临床优势,自救设备也不能替代指南推荐的标准急救流程^[6]。

4 自救装置的构型设计与压力控制策略

基于腹部冲击原理的自救装置,需要将人工动作转化为作用位置稳定、方向明确且能够重复实施的机械脉冲。装置通常包括定位固定结构、执行机构、腹部施压端、传感控制模块及紧急释放结构。设计重点不仅是产生机械输出,还要减少装置滑移、定位偏差和局部压力集中,使作用力能够有效传递至胸腔。

按照使用方式,机械腹部冲击装置可分为手持式、支撑式和穿戴式。手持式结构简单,但患者需要同时完成定位、持握和启动。支撑式装置利用固定结构提供反作用力,能够减少手部力量不足的影响。穿戴式装置通过腰带或环抱结构固定于躯干,便于集成执行器和传感器,但需要解决快速穿戴、不同体型适配及紧急解除问题。

施压模块应位于脐上、剑突下方,并避开剑突和肋弓。施压端宜采用具有适当曲率和柔性的接触面,以减少局部压力集中。执行机构可采用弹簧、连杆、气动或电动直线驱动。弹簧机构响应较快,但实时调节能力有限。气动机构具有一定柔顺性,但压力建立速度和气密性需要保证。电动直线驱动便于调节速度、位移和冲击次数,但必须设置过载、堵转、断电回缩和机械限位保护。

压力控制不能只设定单一输出力。执行器作用力、接触压强、推进位移、推进速度、压力上升时间和冲击次数均会影响胸腔压力及呼气气流^[5,7]。固定参数控制简单,但难以适应体型差异。较合理的工程策略是采用分级输出和力一位移联合限制。装置先以较低机械负荷实施初始冲击,未观察到通气恢复时再在安全范围内调整。同时设置最大作用力、最大位移、最大推进速度和最长脉冲时间,任一参数达到上限后立即停止并回缩。

正式冲击前可采用低强度预紧,判断施压端是否与腹壁稳定接触。若较小位移即出现作用力快速升高,可能提示施压端接近骨性结构、固定过紧或机械运动受阻。若位

移增加而作用力变化较小,可能与软组织变形、固定松动或装置滑移有关。预紧检测只能辅助判断接触状态,不能直接测量腹腔压力,也不能据此确定最佳冲击强度。

单次机械冲击可分为预紧、快速推进、短时峰值、快速回缩和间隔评价。快速推进有利于产生瞬时压力变化,持续缓慢压迫则可能难以形成有效气流。模拟研究提示,人体体位和操作方式可影响模型气道压力^[12]。院前资料显示,腹部冲击总体成功率为 46.6%,首次操作成功率为 41.5%,成功病例中意识受损和心搏骤停的比例较低^[14]。该研究未测量具体冲击力和位移,因此不能用来确定机械装置参数,也说明达到预设输出不能直接等同于异物已经排出。

安全终止是控制系统的重要组成部分。发生装置移位、固定松脱、力或位移异常、传感器故障、电机堵转或患者体位改变时,应立即停止输出。人因工程研究显示,43 名未经专项培训的医学及护理学生对两种负压装置的正确步骤完成率为 80%~100%,但两种装置的完成时间存在差异。相比之下,受试者对标准气道异物梗阻流程的正确完成率较低^[13]。这一结果提示,装置操作可以较快掌握,但启动顺序、提示方式和与标准流程的衔接仍需清晰设计。

5 自适应腹压脉冲自救装置的应用与评价

针对患者独处时难以完成规范腹部冲击的问题,本项目提出自适应腹压脉冲气道异物梗阻自救装置。该装置以腹部冲击原理为基础,拟通过穿戴式固定结构,将人工动作转化为位置相对稳定、参数可以监测并能够重复输出的机械脉冲。装置由固定定位结构、上腹部施压模块、机械执行机构、力与位移检测模块、控制模块及紧急释放结构组成。

正式冲击前,装置通过低强度预紧判断施压端与腹壁的接触状态。冲击过程中同步监测输出力、推进位移、速度和脉冲时间,任一参数达到安全上限时立即停止并回缩。稳定支撑有助于腹部冲击产生胸腔压力^[5],但压力升高不等同于异物排出,因此控制重点应是形成短时脉冲并限制过度加载,而非追求更大的峰值输出。

该装置主要面向患者仍保持意识、能够识别窒息状态并自主启动设备,但现场暂时缺少他人施救的场景。可能的应用包括独居者进食时发生严重梗阻,老年人在家庭或养老机构内短时间无法获得帮助,以及公共场所现场人员不能及时完成规范腹部冲击等。对于上肢力量不足或无法借助椅背自救者,穿戴式装置可能提供相对稳定的施压位置。婴儿、失去意识者和无法自主操作装置者不属于其适用对象。妊娠、近期腹部手术或存在严重胸腹部疾病者,

也不宜直接使用普通腹部冲击式装置。该装置只能作为标准急救流程的补充。

装置效果不能只用异物是否排出评价,还应考察机械性能、模拟排异、安全性及人因工程。机械评价包括输出力和位移的准确性、脉冲重复性、推进和回缩时间、急停响应、过载保护及断电释放能力。模拟排异可在人工气道或急救模拟人中设置不同大小、材质和嵌顿程度的异物,记录排出率、排出时间、冲击次数、峰值气道压力、呼气流量及异物是否向远端移动。

安全评价应关注腹壁局部压强、最大位移、剑突及肋弓受力和重复冲击的累积负荷。既往文献已报道腹部冲击相关的胸腹部及腹腔脏器损伤^[6,8]。因此,即使装置能在模型中排出异物,也不能据此认定其对人体安全。后续可结合压力阵列、胸腹仿生模型、有限元分析、离体组织或尸体模型,观察不同接触面积、施压位置和脉冲参数下的力学反应。

人因工程会直接影响装置在真实急救中的价值。严重梗阻患者可能存在恐慌、动作协调下降和进行性缺氧,复杂的穿戴步骤会延误操作。文献^[13]显示,未经专项训练的医护学生能够较快使用两种负压装置,但不同装置完成时间存在差异,标准急救流程的正确执行仍有不足。这提示自救装置应减少操作环节,提供清晰的定位、启动、停止和释放提示,同时不能使使用者忽视呼救及标准急救措施。

目前装置相关证据仍存在明显局限。模拟人研究显示不同装置的异物清除效果不同^[9],但模型气道材料、胸腹顺应性和异物嵌顿状态与人体存在差异。尸体研究虽更接近人体解剖,却缺少活体组织张力和生理反应,研究结果也可能受异物种类和操作方法影响^[11]。系统评价显示,现有证据多为观察性研究、病例报告或模型试验,总体确定性较低^[6]。真实院前腹部冲击也并非在所有病例中均能成功,其效果与患者状态及现场条件有关^[14]。

因此,本项目装置目前应被视为对腹部冲击机械化和闭环控制的工程探索。后续应统一人工气道模型、模拟异物和结局指标,明确作用力、位移、速度和冲击次数的安全边界,并完整记录装置使用前后的传统急救措施。在获得充分的模型、生物力学、人因工程和临床证据前,不能将达到设定机械参数直接等同于异物排出,也不能认为装置能够替代标准急救流程。

6 结语

气道异物梗阻自救装置可在患者独处或现场施救暂时不足时提供机械辅助。其设计核心不是简单提高作用力,而是保证施压位置、固定方式、脉冲输出和安全终止之间

的协调。力一位移联合限制、低强度预紧和分阶段脉冲控制具有一定工程合理性,但尚缺少统一参数和充分临床证据。未来应通过标准化模型、生物力学、人因工程和真实世界研究,明确不同装置的有效性、适用人群及安全边界,使其在不延误标准急救的前提下发挥补充作用。

参考文献:

- [1] ZHENG P, ZHANG N, CHEN Z, et al. Global, regional, and national assessment of foreign body aspiration (1990 - 2021): novel insights into incidence, mortality, and disability-adjusted life years[J]. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, 2025, 33(1): 40. DOI: 10.1186/s13049-025-01352-z.
- [2] IGARASHI Y, NORII T, KIM S H, et al. Airway obstruction time and outcomes in patients with foreign body airway obstruction: multicenter observational choking investigation[J]. *Acute Medicine & Surgery*, 2022, 9(1): e741. DOI: 10.1002/ams2.741.
- [3] KLEINMAN M E, BUICK J E, HUBER N, et al. Part 7: Adult basic life support: 2025 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care[J]. *Circulation*, 2025, 152(16 Suppl 2): S448-S478. DOI: 10.1161/CIR.0000000000001369.
- [4] JOYNER B L Jr, DEWAN M, BAVARE A, et al. Part 6: Pediatric basic life support: 2025 American Heart Association and American Academy of Pediatrics Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care[J]. *Circulation*, 2025, 152(16 Suppl 2): S424-S447. DOI: 10.1161/CIR.0000000000001370.
- [5] PAVITT M J, SWANTON L L, HIND M, et al. Choking on a foreign body: a physiological study of the effectiveness of abdominal thrust manoeuvres to increase thoracic pressure[J]. *Thorax*, 2017, 72(6): 576-578. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2016-209540.
- [6] COUPER K, ABU HASSAN A, OHRI V, et al. Removal of foreign body airway obstruction: a systematic review of interventions[J]. *Resuscitation*, 2020, 156: 174-181. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2020.09.007.
- [7] DAY R L, CRELIN E S, DUBOIS A B. Choking: the Heimlich abdominal thrust vs back blows: an approach to measurement of inertial and aerodynamic forces[J]. *Pediatrics*, 1982, 70(1): 113-119. DOI: 10.1542/peds.70.1.113.
- [8] LEE S L, KIM S S, SHEKHERDIMIAN S, et al. Complications as a result of the Heimlich maneuver[J]. *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, 2009, 66(3): E34-E35. DOI: 10.1097/01.ta.0000219291.27245.90.
- [9] PATTERSON E, TANG H T, JI C, et al. The efficacy and usability of suction-based airway clearance devices for foreign body airway obstruction: a manikin randomised crossover trial[J]. *Resuscitation Plus*, 2021, 5: 100067. DOI: 10.1016/j.resplu.2020.100067.
- [10] DUNNE C L, OSMAN S, VIGUERS K, et al. Phase One of a Global Evaluation of Suction-Based Airway Clearance Devices in Foreign Body Airway Obstructions: a retrospective descriptive analysis[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(7): 3846. DOI: 10.3390/ijerph19073846.
- [11] RAMASWAMY A, DONE A, SOLIS R, et al. The efficacy of two commercially available devices for airway foreign body relief: a cadaver study[J]. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, 2023, 8(3): 708-711. DOI: 10.1002/lio2.1057.
- [12] SANUKI T, SUGIOKA S, SON H, et al. Comparison of two methods for abdominal thrust: a manikin study[J]. *Resuscitation*, 2009, 80(4): 499-500. DOI: 10.1016/j.resuscitation.2008.12.011.
- [13] CARDALDA-SERANTES B, CARBALLO-FAZANES A, RODRÍGUEZ-RUIZ E, et al. Would anti-choking devices be correctly and quickly managed by health science students? A manikin crossover trial[J]. *BMC Medical Education*, 2023, 23(1): 365. DOI: 10.1186/s12909-023-04345-7.
- [14] SUGA R, IGARASHI Y, KITANO S, et al. Effectiveness of the abdominal thrust maneuver for airway obstruction removal: analysis of data from the National Emergency Medical Services Information System[J]. *Journal of Nippon Medical School*, 2024, 91(3): 270-276. DOI: 10.1272/jnms.JNMS.2024_91-305.

基金项目: 宁夏医科大学大学生创新创业训练计划项目(项目编号: 202510752020)。

作者简介: 张鑫(2006-), 男, 宁夏固原人, 宁夏医科大学医学检验技术专业 2024 级学士本科生在读, 研究方向: 急救医学与智能医疗器械。