

典型战术动作对空气呼吸器耗气速率和救援人员心率的影响

李伟东¹, 张建福², 李 玉¹

¹中国人民警察大学, 河北 廊坊

²烟台市消防救援支队, 山东 烟台

收稿日期: 2022年8月13日; 录用日期: 2022年9月13日; 发布日期: 2022年9月22日

摘 要

选取平地负重行进、抬担架救人、低姿搜救、受限空间行进、负重登楼五种典型的战术动作, 研究了不同动作下空气呼吸器耗气速率和消防救援人员心率的变化规律。研究发现: 紧急情况下空气呼吸器的耗气量更多, 测试者的心率升高速度更快。其中, 在进行平地负重行进和负重登楼动作时, 测试者分别在 37 s 和 26 s 时达到最大心率, 约 132 BMP 和 178 BMP。另外, 进行低姿搜救时, 心率增加速度最慢。测试者心率随战术动作的进行均呈现先迅速升高后趋于平缓的规律。本研究可为消防救援人员在不同灾害事故现场中空气呼吸器的实际使用提供理论指导。

关键词

战术动作, 空气呼吸器, 耗气速率, 心率分析

Effect of Typical Tactical Movements on Consumption Rate of Air Respirator and Heart Rate of Fire and Rescue Personnel

Weidong Li¹, Jianfu Zhang², Yu Li¹

¹China People's Police University, Langfang Hebei

²Yantai Fire Rescue Detachment, Yantai Shandong

Received: Aug. 13th, 2022; accepted: Sep. 13th, 2022; published: Sep. 22nd, 2022

Abstract

The consumption rate of respirators and heart rate of fire and rescue personnel were studied under different typical tactical movements, such as moving with heavy load on flat ground, carrying stretchers to save people, rescuing maintaining a low profile, moving in limited space, and climbing with a heavy load. The results showed that the emergency ventilator used more air and the participants' heart rates increased faster than normal, reaching their maximum heart rate at 37 seconds for moving with a heavy load on flat ground and 26 seconds for climbing with a heavy load, the maximum values were 132 BMP and 178 BMP, respectively. In addition, the increase rate was slowest when rescuing maintains a low profile. The heart rate of all the subjects increased rapidly at first and then leveled off with the progress of tactical movements. This study provides theoretical guidance for the actual use of air breathing apparatus in fire scenes.

Keywords

Tactical Movements, Air Breathing Apparatus, Air Consumption Rate, Heart Rate Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

正压式空气呼吸器是消防救援部队配备最普遍、使用率最高的个人呼吸防护装备,是消防救援人员在充满浓烟、毒气的环境中安全进行灭火救援行动的关键保障。然而在战斗中,空气呼吸器的实际使用时间与理论时间存在较大差异,这不仅使指挥员在灭火战术的布置上造成很大困扰,更重要的是可能由于空气呼吸器余气不足,导致消防救援人员未能及时撤出火场,从而造成更大的人员伤亡。

针对空气呼吸器在实战中的使用时间问题,国内外学者做了许多相关的研究。2010年,杜希[1]在首届中国消防协会科学技术年会上最先报道了影响正压式消防空气呼吸器使用时间的因素,为研究不同灾害现场下空气呼吸器的实际使用时间奠定了基础。另外,杜希[2]还研究了不同劳动强度下消防员佩戴空气呼吸器的生命体征指标和使用时间,探讨了延长空气呼吸器使用时间的办法。李大祖等[3]模拟了灭火救援实战环境,针对空气呼吸器实际使用时间与理论使用时间差异较大的问题,提出了许多建设性的意见。杜欣等[4]在贴近实战应用的环境下,对空气呼吸器的供气性能进行了较为详细的试验测试,确定了消防员在灾害事故现场的不同作业条件下使用空气呼吸器的参考数值。张禹海[5]研究了点式、战术、R式、吸管和手轮五种应急延时呼吸方式,以及在气瓶气量充足和气瓶气量不足余气报警阀开启两种情况下正压式空气呼吸器的使用时间。

国外研究机构在进行空气呼吸器实际使用时间研究过程中,通常都与消防员人体基础生理指标相结合。2001年,Astrand [6]第一次以训练过程中消防员的生理性应力作为标准,对三种不同类型的空气呼吸器使用时间进行了比较评估,确定了消防员空气呼吸器使用时间与劳动强度的相关性。Williams [7]在进行模拟地铁系统紧急搜救时,测试了消防员的心率和空气呼吸器的使用时间。Philémon [8]、Peçanha [9]、Taylor [10]等人分别研究了消防员佩戴正压式空气呼吸器进行不同的模拟救援行动,收集测试者的生理反应和知觉反应,对比发现佩戴空气呼吸器会增加消防员的心理、生理扰动。

总体而言,国内的研究侧重于空气呼吸器的材质,以延长使用时间为目标;国外则以消防员体能消耗实验为主。在本文中,作者借鉴国内外研究的先进经验,针对目前研究的不足,创新性地选取了五种典型的战术动作,如:平地负重行进、抬担架救人、低姿搜救、受限空间行进、负重登楼,通过实验测试了在不同的战术动作下空气呼吸器的耗气量、耗气速度以及消防救援人员的生命体征变化,研究不同环境下消防救援人员的生理特性和空气呼吸器实际使用时间,为进一步提升消防救援人员的救助能力、保障自身生命安全提供了可靠的技术支撑。

2. 实验

2.1. 主要设备

根据邢静波[11]对呼吸器配备情况的调查,本实验选取巴固牌正压式空气呼吸器为研究对象。该品牌空气呼吸器以压缩空气为气源,气瓶容积 6.8 L,气瓶额定最大工作压力为 30 MPa,重量为 8 kg,最大出气量 2040 L,最大供气流量 ≥ 1000 L/min,吸气阻力 ≤ 500 Pa。各项参数都符合国家行业标准《正压式消防空气呼吸器 XF124-2013》的要求。

2.2. 测试人员的选取

测试人员选取中国人民警察大学灭火与应急救援技术专业的在校男性学员,平均年龄 24.6 岁,身高均在 179~181 cm 之间,体重均在 72~75 kg 之间,体重指数均在 22~23 之间,呼吸频率均在 16~17 次/min,肺活量均在 5300~5500 ml 之间,且所有人员身体健康状况良好,无心脏病和呼吸疾病病史。

2.3. 心率的实时测试

选用蓝牙心率带实时监测实验人员的心率。使用前,用水润湿心率带后面的电极,将心率带佩带在胸肌正下方,将传感器调整至正中间,心率带的两侧胶条紧贴皮肤。

2.4. 空气呼吸器耗气速率的测量

为保证读数的精确性,将空气呼吸器配套的压力表换成电子压力表,内置高精度压力传感器,加入中央处理器,通过 GPRS/LTE/NB-IOT 网络,将压力值上传至数据中心。压力表的量程范围为 0~35 MPa,过载压力为 1.5 倍满量程,精度等级为 0.5 级,使用温度为 -20°C ~ 60°C 。

2.5. 典型战术动作的选择

参考国内外消防救援人员对空气呼吸器使用的训练,结合基层指战员的参考意见,本实验选定了平地负重行进、抬担架救人、低姿搜救、受限空间行进、负重登楼 5 种典型战术动作进行研究。

平地负重行进如图 1(a)所示,测试者穿戴防护服并佩戴空气呼吸器,携带一支直流水枪和两盘 D65 消防水带,速度控制在 4.5~5.0 km/h 之间,行进距离为 800 m。行进途中每 50 m 横放一条水带,模拟地面散落的障碍物。

抬担架救人如图 1(b)所示,一名人员配合测试者,用担架抬起 60 kg 假人,在训练场行进 300 m。

低姿搜救如图 1(c)所示,测试者将面罩用黑布蒙上,保持低姿进行对被困人员的搜索。搜索过程中,采用手摸脚探、前虚后实的动作,至少一只膝盖与地面接触。

受限空间行进通过烟热多功能模拟训练系统完成,如图 1(d)~(e)所示。测试者进入受限的空间后,翻越各种障碍,摸索行进路线。

负重登楼如图 1(f)所示,测试者穿戴防护装备并携带水枪和消防水带,快速登上 8 楼。根据训练要求,测试者到达顶楼后,立即打开一盘水带并连接水枪,保持站立射水动作 2 min。



Figure 1. (a) Moving with heavy load on flat ground; (b) Carrying stretcher to save people; (c) Low position search and rescue; (d)~(e) Moving in limited space; (f) Climbing with heavy load

图 1. (a) 平地负重行进; (b) 抬担架救人; (c) 低姿搜救战术; (d)~(e) 受限空间行进; (f) 负重登楼

3. 结果和分析

3.1. 不同战术动作下，空气呼吸器耗气速度的变化

测试者在非紧急情况下执行不同的典型战术动作，通过压力表进行全程监测，得到不同动作下的空气呼吸器耗气量和耗气速率，结果如表 1 所示。

可以看出，平地负重行进时平均耗气速率最低，约为 0.58 MPa/min，根据平均耗气速率可以计算出，一台满载的空气呼吸器(30 MPa)能持续供气约 51 分钟，行进距离约 4500 米。负重登楼时的平均耗气速率最高，约为 1.22 MPa/min，满瓶的空气呼吸器能持续供气约 25 分钟。当进行抬担架救人、低姿搜救和受限空间行进时，空气呼吸器可以持续供气的时间分别为 34 分钟、39 分钟以及 26 分钟。

另外，根据战术要求，测试者在登顶后立即铺设水带，并保持射水姿势约 2 分钟。这段时间空气消耗量约为 2.50 MPa，平均耗气速率约为 1.25 MPa/min。这是因为在登顶结束后，人体的摄氧量不能立刻恢复，机体仍然保持高的代谢水平，需要吸收大量的氧气来消耗能量，此为过量氧耗(EPOC) [12]。运动强度越大，过量氧耗也越大，在恢复期的摄氧量也更高。

Table 1. The variation of air respirator parameters and consumption rate under different tactical movements
表 1. 不同战术动作下，空气呼吸器的参数变化及耗气速率

测试参数	战术动作	平地行走	担架救人	低姿搜救	受限空间	负重登楼
测试前气瓶压力(MPa)		25	25	25	25	25
测试后气瓶压力(MPa)		22.37	22.21	22.28	22.21	23.13
耗气量(MPa)		2.63	2.79	2.72	2.79	1.87
持续时间(s)		271	194	215	145	92
平均耗气速率(MPa/min)		0.58	0.86	0.76	1.15	1.22

3.2. 不同战术动作下，消防救援人员心率的变化

消防救援人员在进行不同典型战术动作训练时，心率的变化如图 2 所示。可以看出，测试者心率随着战术动作的进行均呈现先增加后渐于平缓的趋势，尤其负重登楼时，心率增加速度最快，心率峰值也最高。

当测试者由静止状态开始进行平地负重行进时，运动强度增大，心率从 80 BMP 迅速升高至 125 BMP。适应了当前运动状态后，心率趋于稳定，平均心率为 122 BMP，其中心率波动可能是测试者跨越平地障碍物时造成的。当进行低姿搜救时，测试者心率表现出与平地负重相似的变化规律。不同的是，在运动初期心率以相对较慢的增加速度升高到 125 BMP。当抬担架救人时，测试者心率快速从 81 BMP 升高至 141 BMP，随后逐渐趋于稳定。在受限空间行进时，测试者的心率出现明显的波动，这与烟热多功能模拟训练系统中的复杂环境(如图 1(d)，图 1(e))有关。最高心率约 152 BMP。当进行负重登楼时，由于运动强度急剧增大，剧烈的无氧运动致使测试者需要消耗更多的氧气，心率迅速升高至 175 BMP。随着恢复时间的延长，心率逐渐下降。

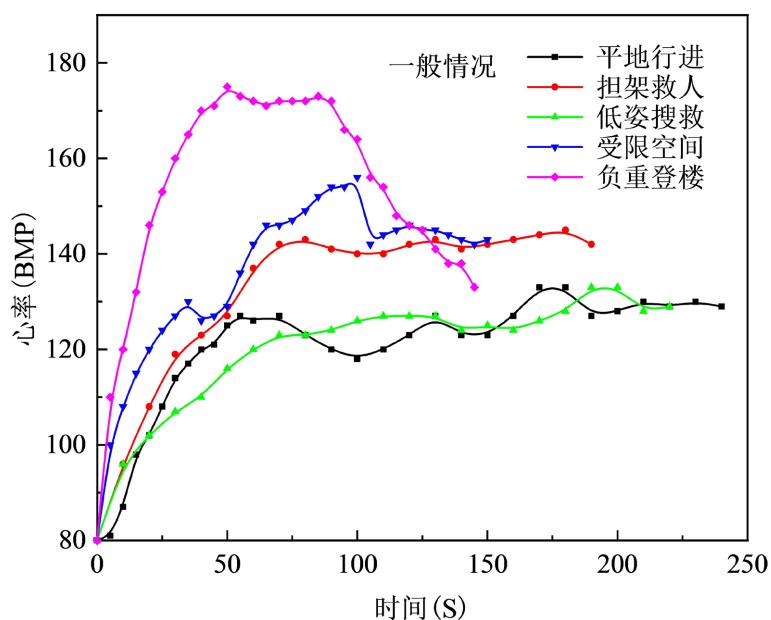


Figure 2. The change of heart rate of fire and rescue personnel during different typical movements in normal circumstances

图 2. 一般情况下，消防救援人员进行不同典型动作时心率随时间的变化

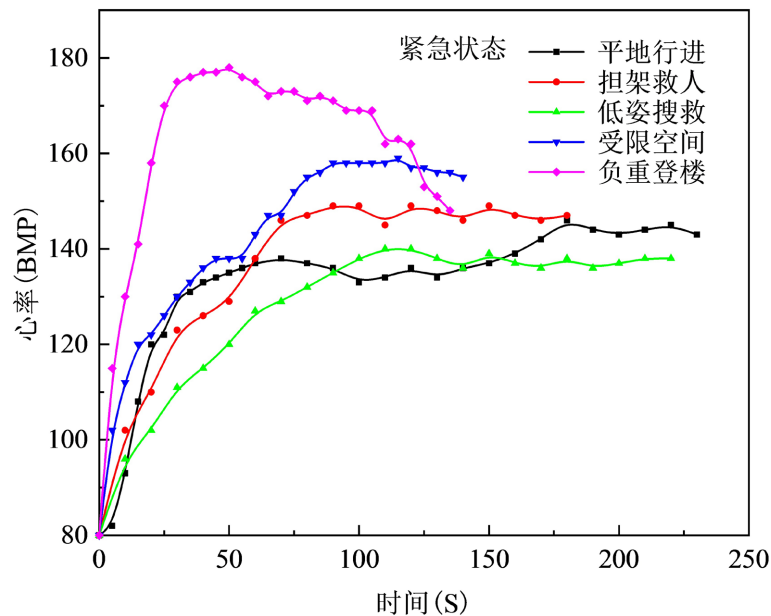
3.3. 紧急情况下，空气呼吸器消耗速率和人员心率的变化

将有突发事件需要快速行动的状态，设为紧急情况。在此情况下，测试者如前文所述进行不同的典型战术动作，空气呼吸器的耗气量如表 2 所示，心率变化如图 3 所示。

可以看出，紧急情况下，测试者的心率上升速度更快，最大心率、平均心率也更高。另外，不同动作下的平均耗气速度也都加剧，其中负重登楼时增加幅度最大，约 42.6%。当平地行进时，测试者大约在 37 s 时，心率达到峰值，约 132 BMP。而正常情况下，测试者大约 50 s 时才达到 125 BMP。当进行负重登楼时，测试者在运动初期达到最大心率的时间约为 26 s，与正常情况下达到最大心率的时间 51 s，相差近 1 倍。

Table 2. The variation of air respirator parameters and air consumption rate under different tactical movements in emergency circumstances**表 2.** 紧急情况下, 进行不同战术动作时空气呼吸器的参数变化及耗气速率

测试参数	战术动作	平地行走	担架救人	低姿搜救	受限空间	负重登楼
测试前气瓶压力(MPa)		25	25	25	25	25
测试后气瓶压力(MPa)		22.08	21.48	22.23	21.47	23.43
耗气量(MPa)		2.92	3.52	2.77	3.53	1.57
持续时间(s)		240	175	178	130	54
平均耗气速率(MPa/min)		0.73	1.21	0.93	1.63	1.74

**Figure 3.** The change of heart rate of fire and rescue personnel during different typical movements in emergency circumstances**图 3.** 紧急情况下, 不同典型动作下消防救援人员的心率随时间的变化

灾害事故现场, 消防救援人员面对错综复杂的情景和繁杂的灭火救援任务, 难免需要快速响应。紧急情况下, 虽然行平地行进的速度提高了, 但运动负荷和运动密度变大, 对于氧气的需求量变大, 空气呼吸器耗气速率上升, 使用时间也随之减少, 因此消防救援人员对空气呼吸器使用时间要有所把握, 避免不必要的伤亡。救援人员在抬伤员行进的过程中, 负重大, 在条件允许的情况下, 需控制好行进速度。一方面保证救援人员和伤员的安全行进, 另一方面可以延长空气呼吸器的使用时间。紧急情况下搜救速度快, 平均耗气速率为 0.93 MPa/min, 一瓶满装的空气呼吸器能持续供气 32 分钟, 比正常情况下空气呼吸器使用时间缩短了 22%。过快的搜救会造成搜索精度变低, 尤其是桌子底下、墙角、窗边等重要地方经常会被忽略, 容易造成对被困人员的遗漏。另外, 在实验过程中发现, 如果一直追求搜救速度, 测试者会发生磕碰、绊倒等状况。因此, 低姿搜救过程中, 要合理的把握搜索速度和精度, 同时要保证自身安全和空气呼吸器的使用时间。受限空间地形错综复杂, 能见度较低, 在紧急情况下, 测试者需要更迅速地探索前进道路, 无论是生理上还是心理上都处于紧张的状态, 耗气量增加, 但是行进速度并未得到明显提高。负重登楼过程中, 如果过度追求登楼速度, 空气呼吸器的耗气速率会急剧提升。攀登楼梯结束后, 消耗率也会保持在较高的数值, 导致空气呼吸器的使用时长大幅度减少。因此, 空气呼吸器的使

用要根据现场情况来权衡利弊。

4. 结论

1) 测试者心率随着战术动作的进行呈现出先迅速升高, 然后趋于平缓的规律。其中负重登楼时心率达到最高, 约 175~178 BMP。

2) 紧急情况下空气呼吸器的耗气量更多, 测试者的心率升高速度更快, 其中在进行平地负重和负重登楼动作时, 达到最大心率的时间分别为 37 s 和 26 s, 变化最明显。

3) 本研究成果为下一步模拟场景和计算消防救援人员在不同灾害事故现场空气呼吸器的实际使用时间提供了理论指导、奠定了研究基础。

致 谢

感谢中国人民警察大学李玉教授对本文的指导; 感谢山东省烟台市消防救援支队的帮助; 感谢课题组人员的支持。

基金项目

中国人民警察大学中青年科研创新计划课题“典型救援战术动作下空气呼吸器耗气量分析”(ZQN202211)。

参考文献

- [1] 杜希. 针对正压式消防空气呼吸器使用时间的训练研究[C]//2010 中国消防协会科学技术年会. 2010 中国消防协会科学技术年会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 648-650.
- [2] 杜希. 不同劳动强度下消防员佩戴正压式消防空气呼吸器的生命体征指标和使用时间研究[C]//2013 中国消防协会科学技术年会. 2013 中国消防协会科学技术年会论文集. 合肥: 中国科学技术出版社, 2013: 295-297.
- [3] 李大祖, 彭冬建. 空气呼吸器几项重要指标的测试分析[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(3): 300-302.
- [4] 杜欣, 李进兴, 吴义娟, 郭欣. 灾害事故现场空气呼吸器供气性能测试与分析[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(2): 251-254.
- [5] 张禹海, 姚昕. 正压式空气呼吸器应急延时呼吸技术[J]. 中国人民警察大学学报, 2022, 38(6): 38-41+46.
- [6] Astrand, P.O. (2001) Will Your Respirator Let You Breathe? *NIOSH/RAND Personal Protective Technology Conference*, Washington DC, November 2001, 1-5.
- [7] Williams-Bell, F.M., Boisseau, G., McGill, J., Kostiuk, A. and Hughson, R.L. (2010) Air Management and Physiological Responses during Simulated Firefighting Tasks in a High-Rise Structure. *Applied Ergonomics*, **2**, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.07.009>
- [8] Philémon, M.M., Gilles, R., Sidney, G., Philippe, G., Sébastien, F. and Alain, G. (2018) Physiological Responses and Parasympathetic Reactivation in Rescue Interventions: The Effect of the Breathing Apparatus. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, **28**, 2710-2722. <https://doi.org/10.1111/sms.13291>
- [9] Peçanha, T., Forjaz, C.L.D.M. and Low, D.A. (2017) Passive Heating Attenuates Post-Exercise Cardiac Autonomic Recovery in Healthy Young Males. *Frontiers in Neuroscience*, **11**, Article 727. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00727>
- [10] Taylor, L., Watkins Samuel, L., Marshall, H., Dascombe Ben, J. and Foster, J. (2016) The Impact of Different Environmental Conditions on Cognitive Function: A Focused Review. *Frontiers in Physiology*, **6**, Article 372. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00372>
- [11] 邢静波. 正压式空气呼吸器使用及测试情况分析[C]//消防科技创新与社会安全发展, 浙江省科学技术协会. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2014: 357-367.
- [12] 陈钢锐, 戴剑松. 运动后过量氧耗的研究综述[J]. 南京体育学院学报(自然科学版), 2017, 16(3): 43-47.