

新型便携式动力送风呼吸器的研制与应用

赵伟博^{1,2}, 李琳杰¹, 魏进¹, 侯国强¹

(1. 陕西工业职业技术大学 航空工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 陕西工业职业技术大学 航空工程学院 咸阳市太阳能光热转换材料重点实验室, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 针对在高粉尘环境下工作者所佩戴的传统防护面罩存在气密性差、过滤效率低、功能单一及长时间佩戴呼吸不畅等问题, 设计了一款新型便携式动力送风呼吸器。该呼吸器包含人机交互界面、滤芯自清洁模块及多级复合滤芯模块等多个功能模块, 可通过通用法兰接口适配市场上现有的自吸式半面罩和全面罩。呼吸器创新设计的多级复合滤芯结构可根据使用场景自由组合滤芯材质, 拆卸便捷; 并首创滤芯自清洁模块, 可定时刮除滤芯表面沉积的大颗粒灰尘, 延长滤芯使用寿命; 动力送风模块设有独立送风风道, 配合风道口处的环境数据检测传感器可实时检测当前空气质量。呼吸器整体结构设计紧凑, 重量轻, 操作方便, 便于穿戴, 其推广应用能够有效改善从事矿井作业、化工生产、疫情防控及抢险救灾等领域工作者的工作环境, 有效防止工作者感染尘肺病等职业疾病。因此, 该研究具有重要的现实意义和社会效益。

关键词: 动力送风呼吸器; 送风量; 便携; 人机界面; 自清洁

中图分类号: TP273

文章编号: 1000-0682(2025)06-0047-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.06.009

Development and application of a novel portable powered air – purifying respirator

ZHAO Weibo^{1,2}, LI Linjie¹, WEI Jin¹, HOU Guoqiang¹

(1. School of Aeronautical Engineering, Shaanxi Polytechnic University; 2. Xianyang Key Laboratory of Solar Thermal Conversion Materials, School of Aeronautical Engineering, Shaanxi Polytechnic University, Shaanxi Xianyang 712000, China)

Abstract: A novel portable powered air – supplied respirator has been devised to tackle the challenges faced by workers in high – dust environments, including inadequate airtightness, low filtration efficiency, limited functionality, and respiratory discomfort during prolonged wear of traditional protective masks. This respirator integrates multiple functional modules, such as a human – machine interface, a self – cleaning filter module, and a multi – stage composite filter module. It is compatible with existing self – inhalation half – masks and full – face masks on the market via a universal flange interface. The respirator features an innovatively designed multi – stage composite filter structure that allows for customizable filter material combinations based on usage scenarios and easy disassembly. Furthermore, it introduces a pioneering self – cleaning filter module that periodically removes large dust particles deposited on the filter surface, thereby extending the filter’s lifespan. The powered air – supplied module boasts an independent air supply channel, which, in conjunction with an environmental data detection sensor at the air outlet, facilitates real – time monitoring of air quality. The respirator boasts a compact design, lightweight construction, user – friendly operation, and ease of wearability. Its widespread adoption can significantly enhance the working conditions for those involved in mining, chemical production, epidemic prevention and control, emergency rescue, disaster relief, and other sectors, effectively safeguarding workers against occupational diseases like pneumoconiosis. Consequently, the research presented in this paper holds significant practical relevance and societal benefits.

Keywords: PAPR; air supply volume; portable; human – machine interface; self – cleaning

收稿日期: 2025 – 07 – 23

基金项目: 咸阳市渭城区科技发展计划项目(2024VCZK – 001); 陕西工业职业技术大学科研基金资助项目(2025YKYB – 011)

第一作者: 赵伟博(1992—), 男, 陕西西安人, 硕士, 讲师, 研究方向为智能控制技术。E-mail: linjie_zwb@163.com

0 引言

随着制造业和实体经济的快速发展以及工业化、城镇化的不断推进,目前我国劳动者患职业病的风险依然十分严峻^[1-3]。职业病防治涉及多个行业,从传统能源化工行业、新兴产业再到第三产业,都存在不同程度的职业病危害,其中煤炭、冶金、有色金属、机械、化工等行业最为突出。职业病危害对劳动者的危害是显而易见的,轻则影响劳动者的生活质量,重则危及生命^[4-6]。职业病危害主要以粉尘为主,职业病患者主要以尘肺病为主,尘肺病是一种由于长期吸入无机矿物质粉尘,如石英粉尘、煤尘等生产性粉尘并在肺内滞留,引起以肺组织弥漫性纤维化为主的全身性疾病,最常见于长期从事矿山开采、隧道挖掘、建筑施工、石材加工、陶瓷制造、金属冶炼等行业的人群,因工作环境中粉尘浓度过高,且防护措施不足,导致粉尘被吸入肺部并沉积^[7-8]。

当前全国乃至全球仍未有一种方案能够有效解决高粉尘环境的问题,佩戴呼吸防护设备就成为了在高粉尘环境下工作者的最后一道防线。在高浓度粉尘环境下,自吸过滤式防尘口罩存在舒适性差、容尘量小、呼吸阻力大、有效防护时间短等诸多问题^[9-11]。而现有动力送风过滤式呼吸器虽然能解决舒适性差、呼吸不畅等问题,但仍存在风量利用率偏低、过滤阻力增长过快、有效防护时间短等问题。因此,如何为在高粉尘环境下作业的工作者设计一款穿戴便捷、高效过滤的呼吸防护设备显得尤为重要。基于此,该文设计了一款新型便携式动力送风呼吸器。该呼吸器包含人机交互界面、滤芯自清洁模块、智能报警模块及多级复合滤芯等多个功能模块。

1 呼吸器结构组成

呼吸器结构如图1所示。该新型便携式动力送风呼吸器主要由主控模块、动力送风模块、电源模块、人机交互模块、多级复合滤芯模块及自清洁模块等多个功能模块组成。呼吸器通过风机将外界空气从上盖板进风口吸入壳体内,并经滤芯组件过滤,过滤后的清洁气体经导流装置输送至上盖板的出风口,出风口经波纹软管连接呼吸面罩。

呼吸器装配效果如图2所示。呼吸器的装配体如图2(a)所示,其人机界面、控制按钮、声光报警及电量显示均集中设计在上盖板,便于使用者实时查看当前信息。呼吸器的主控模块和电源模块设置于呼吸器左侧,与动力送风模块隔离,可有效隔绝外界灰尘进入主控系统。壳体背面采用人体工程学设

计,圆滑过渡,腰带经三段式固定装置固定于呼吸器壳体上,穿戴方便快捷,如图2(b)所示。

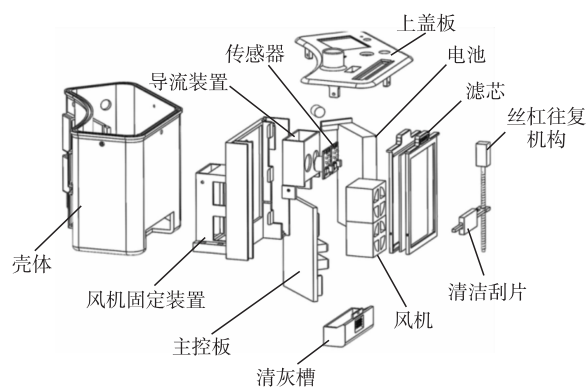
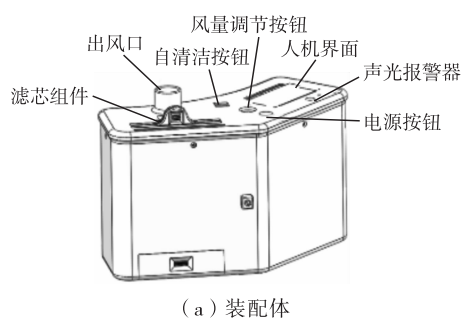
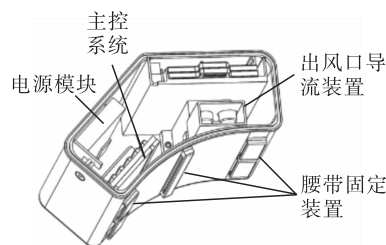


图1 呼吸器结构爆炸图



(a) 装配体

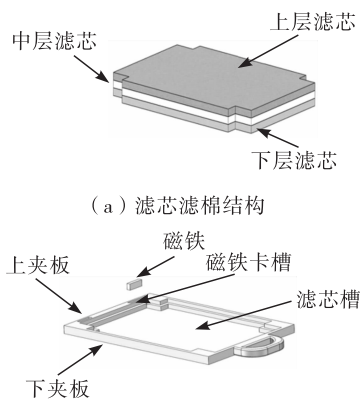


(b) 内部装配效果

图2 呼吸器装配效果图

1.1 多级复合滤芯模块

如图3所示,该文创新研发了多级复合滤芯模块,该模块主要由3层复合滤芯、定位磁铁、滤芯夹板和滤芯放置卡槽组成。



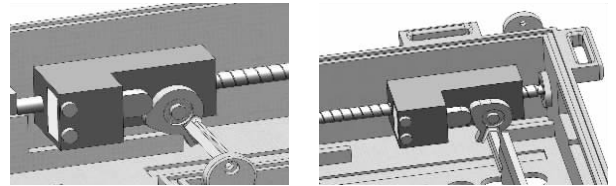
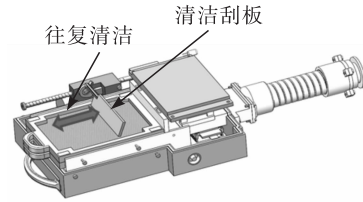
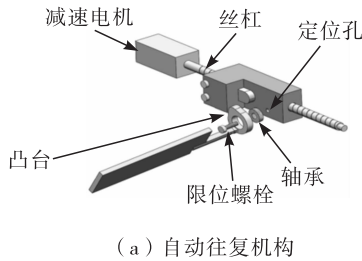
(a) 滤芯滤棉结构
(b) 滤芯装配

图3 多级复合滤芯结构图

复合滤芯放置于滤芯槽内,通过上下两颗磁铁进行定位并固定在滤芯夹板上。模块最上层的 G4 无纺布,主要过滤大于 $5\ \mu\text{m}$ 的尘埃颗粒,在整个滤芯结构中起到预过滤的效果;中层滤芯采用了活性炭过滤,可有效阻隔空气中的苯、氨、甲醛、二氧化硫等有害气体,对于有害的气体、液体的过滤作用是普通口罩的 30 倍;最下层滤芯采用了 BFE99 熔喷布,在 $72\ \text{L}/\text{min}$ 流量下检测, $0.1\ \mu\text{m}$ 的细菌颗粒过滤效果达到 99%。

1.2 滤芯自清洁模块

如图 4(a)和图 4(b)所示,自清洁模块通过电机驱动器驱动减速电机带动丝杠上的自动往复机构,刮除滤芯上所吸附的灰尘,能够有效延长滤芯使用寿命,避免在高粉尘聚集区工作时频繁更换滤芯。如图 4(c)和图 4(d)所示,自动往复机构采用凸轮凸台结构进行清洁刮板的自动换向,当清洁刮板接触到滤芯边缘时,便会被边缘顶住,清洁刮板则反方向位移,而清洁刮板末端的凸轮会顶向伸缩凸台,此时清洁刮板向反方向换向从而进行往复运动。



(c) 左侧凸轮换向 (d) 右侧凸轮换向

图 4 滤芯自清洁运动示意图

2 主控系统设计

该动力送风呼吸器的主控系统电路原理如图 5 所示,主控模块选用 ESP32 - WROOM - 32E 开发板控制,该开发板具有 Wi - Fi 和蓝牙双连接模式,有着丰富的外设接口,满足设备所需连接的所有外设需求,同时具备高度集成的电平转换技术,大大简化了逻辑电路对功率器件的控制要求,在工程上减少了控制变压器的数量,降低了产品成本,提高了系统可靠性。ESP32 - WROOM - 32E 的操作系统带有 LWIP 的 FREEROTS,还内置了带有硬件加速功能的 TLS1.2,同时还支持 OTA 加密升级可以在产品发布后进行远程升级。

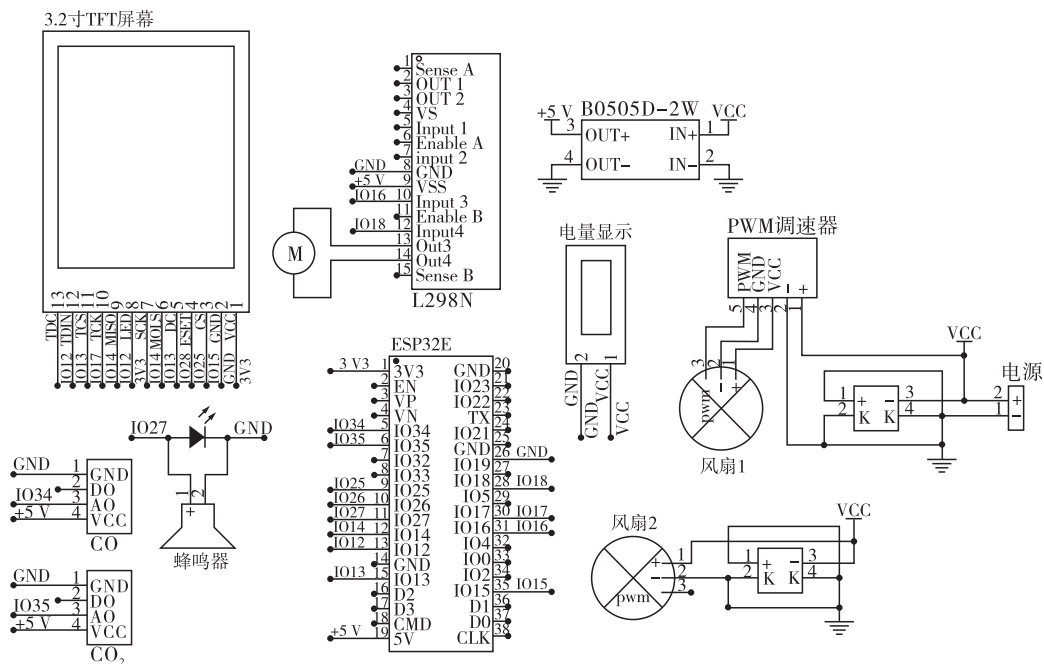


图 5 电路原理图

主控系统选用 12 V 聚合物锂电池,此类电池采用固体电解质作为储能介质,相较于传统的电池所使用的电解液有着体积小,寿命长,不易燃等优点。动力送风模块采用 PWM 调速器进行风量调节,此类调速器可以根据不同的风扇型号进行脉宽调制,可以进行无级调节。同时,在风道处设置有空气质量检测传感器,实时检测当前空气中有害气体含量,当含量超过阈值时通过屏幕、蜂鸣器和报警灯进行报警提示。

自清洁系统采用了 L298N 电机驱动板带动直流电机进行往复运动,L298N 通过控制主控芯片上的 I/O 输入端,直接通过电源来调节输出电压。项目组选择的直流减速电机,其最大扭矩为 4 kg/cm,但所需电流只有 1 A。电机输出端所使用的减速齿轮将电机转速进行减速后输送至丝杠进而带动清洁刮板进行往复运动。

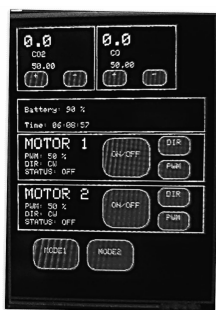
3 人机交互界面设计

人机交互界面 TFT 显示屏如图 6(a)所示,选用 3.2 寸 TFT 的 LCD 显示屏设计系统人机交互界面,该屏幕支持 16BITRGB65K 色显示,显示色彩丰富 320 × 240 分辨率,自带触摸功能,结构简单,使用寿命长。

系统采用 Arduino IDE 开发环境进行程序设计,程序初始化定义 Wi-Fi 的名称和密码,使其连接 Wi-Fi 后进入系统界面,对整个系统界面的 UI 显示进行像素点绘制,绘制完成的 UI 界面如图 6(b)所示。其中 MOTOR1 为动力送风模块的风机,MOTOR2 为自清洁模块的减速电机。



(a) TFT显示屏



(b) UI界面

图6 人机交互界面

人机界面可实时读取传感器数值,并可根据使用场景设定报警阈值,阈值调节范围 0 ~ 1000 PPM,设定初始阈值为 500 PPM,传感器所读取到的阈值达到 500 PPM 时将连接蜂鸣器和 LED 灯的 IO 接口拉至高电平,使其通电报警,报警信息可以在屏幕实时显示。其中,MODE1 为手动旋钮调节模式,通过按钮进行风量和滤芯自清洁控制;MODE2 为屏幕调节模式,可在触摸屏上对系统进行实时控制。

4 样机穿戴测试

4.1 样机制作

如图 7 所示,便携式动力送风呼吸器的壳体及内部结构件均采用 3D 打印制作。样机壳体打印材料选用 ABS,面罩接口和内部结构件选用 PLA 材料进行打印。各零部件之间采用橡胶密封垫进行密封装配。



图7 便携式动力送风呼吸器实物样机

便携式动力送风呼吸器整机尺寸为 238 mm × 120 mm × 165 mm,重量为 2.47 kg。样机定型量产后可采用注塑生产,重量可控制在 1.8 kg 左右。样机穿戴效果如图 8 所示。



图8 穿戴效果

4.2 应用测试

呼吸器分别在陕西长武亭南煤业有限责任公司、延长石油沐浴联合站、陕西化建工程公司和秦始皇陵博物院进行了样机的穿戴测试。如图 9 所示,系统样机测试者有煤矿工人、输送管道检测测员和文物修复人员,以上测试人员的工作强度分别对应高、中、轻 3 种等级。其中煤矿工人更加重视操作

的便捷性,倾向于整机旋钮控制,同时对续航时间和佩戴舒适性提出了较高要求;管道检测员更加重视整机重量,穿戴便携性和佩戴舒适性;文物修复工作者希望使用密合型全脸面罩,对样机体积和佩戴方式提出了改进建议。



图9 动力送风呼吸器应用调研

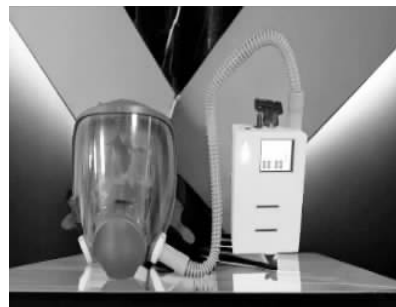
改进型动力送风呼吸器如图10所示。通过样机实际穿戴测试和潜在用户的实地调研反馈,按照高、中、轻3种不同工作强度分别设计了3款便携式动力送风呼吸器。同时,提供2种防护面罩,分别为密合型半面罩和密合型全脸面罩,以满足不同使用者的要求。

通过多场景不同工作岗位的穿戴测试调研,绝大多数的受试者均表示该便携式动力送风呼吸器能有效改善普通防护面罩呼吸不畅等问题,且身体和

心理上更加舒适。少数受试者对呼吸器的重量和佩戴方式给出了一些建议。



(a) 用于轻度工作强度



(b) 用于中度工作强度

图10 改进型动力送风呼吸器

与国内外龙头企业生产的动力送风过滤式呼吸器的核心技术参数进行对比,该便携式动力送风呼吸器在送风量、整机重量、续航时间及功能性方面均有明显优势。具体技术参数见表1。

表1 技术参数对比

产品名称	最大送风量/ (L/min)	持续工作 时间/h	整机重量/kg	过滤元件	呼吸阻力	辅助功能
3M公司 TR-300 呼吸器	110	6~10	2.8	需拆机更换、滤芯材料固定	0.16	无
思创科技 Freely DPD12 呼吸器	115	8~10	3.0	需拆机更换、滤芯材料固定	0.17	智能预警、低电量预警
该文研制设备	120	8~12	1.2~2.5	无需拆机更换、直接插拔; 滤芯材料自由搭配	0.17	智能预警、滤芯自清洁

5 结语

该文研制的新型便携式动力送风呼吸器通过配套接口可直接连接市场上现有的半面罩和全面罩,方便快捷。根据样机的调研试用发现,受试者均表示此款呼吸器重量轻、送风量可实时调节且操作界面简单,可进行实时环境预警。

该便携式动力送风呼吸器采用模块化设计,其自主送风模块可实现风量实时调节,有效解决了传

统自吸式面罩呼吸不畅等问题;创新设计的滤芯自清洁模块可定时刮除滤芯表面沉积的大颗粒粉尘,延长滤芯有效使用时间;同时,该呼吸器的多级复合滤芯结构可根据不同使用场景自由更换滤芯,提高防护效率。目前,该呼吸器已通过东莞倍通检测技术有限公司和深圳中安质量检验认证有限公司的检测,其送风量、呼吸阻力及过滤效率等核心参数均远超国标要求,具有广泛的技术应用市场。

(下转第56页)



(d) 边缘破损

图 8 缺陷识别效果

5 结论

为解决明胶片生产过程中的表面缺陷精确检测、自动筛选、计量称重等关键技术需求,设计开发了 1 套智能筛选称重设备,与明胶片生产线剪切工序衔接,执行检测、筛选、计量称重等任务。采用 YOLOv10 深度学习算法检测明胶片表面缺陷,实现了缺陷精准实时检测与分类。生产现场试运行情况表明,该设备运行稳定,其工作效率和缺陷检测准确率均达到了生产要求。该设备在生产线应用后,实时采集分析缺陷类型、数量等关键质量数据,为生产工艺优化、配方升级等提供了可靠的决策依据。与传统的依靠人工检测、称重模式相比,该设备的应用显著提升了明胶片生产的智能化水平,能够助力传统制造业降低生产成本,实现数字化、智能化转型升级。

参考文献:

- [1] 姚龙坤,顾平远,黄文涛. 明胶在食品工业中的应用简述[J]. 明胶科学与技术,2009,29(01):24-25.
- [2] YING Qingfang, ZHAN Shengnan, YU Haixia, et al. Gelatin based preservation technologies on the quality of food: a comprehensive review [J]. Critical Reviews in

Food Science and Nutrition, 2024, 64 (10): 1-20.

- [3] Tyuftin A A, Kerry J P. Gelatin films: Study review of barrier properties and implications for future studies employing biopolymer films [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 29(4):100688.
- [4] Safari, R., Yaghoubi, M., Marcinkowska - Lesiak, M., et al. The effects of double gelatin containing chitosan nanoparticles - calcium alginate coatings on the stability of chicken breast meat [J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(12):7673-7685.
- [5] 谢观凤,李培源. 明胶的制备及其应用研究[J]. 山东化工,2019,48:76-81.
- [6] 何军红,温观发,黎长鑫. 优化 FasterR - CNN 算法的小样本缺陷检测研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2024(05):94-101.
- [7] 陈宜涛,方成刚,张文东,等. 基于机器视觉的工业零件智能分拣系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2024(06):24-29.
- [8] 孟永. 基于深度学习的光学薄膜元件损伤识别与分类研究[D]. 西安:西安工业大学,2024.
- [9] 邓海云,陈新辉. 基于 Halcon 深度学习的高分子薄膜表面缺陷检测[J]. 机电工程技术,2024,53(07):153-157.
- [10] Islam M J, Basalamah S M, Ahmadi M, et al. Computer Vision - Based Quality Inspection System of Transparent Gelatin Capsules in Pharmaceutical Applications [J]. American Journal of Intelligent Systems, 2012, 2(1):14-22.

(上接第 51 页)

参考文献:

- [1] 党天华,赵蒙蒙,钱静. 降温服的研究现状及应用前景[J]. 毛纺科技 2021,49(06):95-100.
- [2] 白雪. 动力送风式滤尘呼吸器的研究现状与发展趋势[J]. 煤矿机电,2021,42(03):36-39.
- [3] 吕成明. 深井矿用新型智能送风呼吸器研发[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.
- [4] 黄心如. 我国尘肺病问题多主体协同治理机制与运行演化研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
- [5] 李敏,李晶杜,华月吴,等. 关于便携式电动呼吸器设计的安全探究[J]. 中国个体防护装备,2022.
- [6] 魏乐乐. 矿用呼吸防护头盔产品设计研究[D]. 徐州:

中国矿业大学,2023.

- [7] 马云龙. 煤矿用自救器及呼吸器检测检验技术现状与建议[J]. 煤矿安全,2022,53(8):139-144.
- [8] 荆鹏俐. 开放式动力送风呼吸器多孔风束优化及防尘机制研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.
- [9] 滕广平. 高浓度粉尘环境呼吸器送风与滤尘特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.
- [10] 赵伟博,李琳杰,王琼瑶. 医用防护服配套穿戴式智能新风防护系统的研制[J]. 工业仪表与自动化装置,2023(02):57-59+89.
- [11] 张奋奋,周孟颖,梁国治,等. 矿用应急降温服降温性能实验研究[J]. 安徽科技,2018(05):51-52.