

中文引用格式:杨昕宇,宋奥涵,赵稼轩,等. 消防员防护服颗粒物阻隔性能研究[J]. 中国安全科学学报,2026,36(3):247-254.

英文引用格式:YANG Xinyu, SONG Yuhuan, ZHAO Jiaxuan. Study on particulate matter blocking performance of firefighter protective suits[J]. China Safety Science Journal,2026,36(3):247-254.

消防员防护服颗粒物阻隔性能研究^{*}

杨昕宇¹, 宋奥涵^{2,3}, 赵稼轩^{2,4}, 刘小勇^{**2}正高级工程师

(1 安徽建筑大学 土木工程学院,安徽 合肥 230601;2 清华大学合肥公共安全研究院 灾害环境
人员安全安徽省重点实验室,安徽 合肥 230601;3 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室,
安徽 合肥 230026;4 中国铁路北京局集团有限公司 北京南站,北京 100071)

中图分类号:X924.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.0733

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3006102)。

【摘要】 为验证不同消防员防护服的颗粒物阻隔性能,利用高精度环境舱和颗粒物发生装置搭建试验平台,使用氯化钠、癸二酸二辛酯和二氧化钛颗粒输出气溶胶混合物,模拟火灾浓烟环境,通过服装内外颗粒物的质量浓度分布计算向内泄漏率,并定量评价4种消防服的颗粒物阻隔性能。结果表明:灭火防护服与抢险救援服在人体上肢部位和下肢部位防护效果欠佳;轻型防化服整体性能最佳,平均总向内泄漏率为4.69%,相比对照组降低92.4%,性能表现优异;4种防护服对小粒径(0.3~1.0 μm)颗粒物都无法起到有效阻隔。

【关键词】 消防员防护服; 浓烟环境; 颗粒物; 阻隔性能; 向内泄漏率; 粒径

Study on particulate matter blocking performance of firefighter protective suits

YANG Xinyu¹, SONG Yuhuan^{2,3}, ZHAO Jiaxuan^{2,4}, LIU Xiaoyong²

(1 School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei Anhui 230601, China; 2 Anhui Provincial Key Laboratory of Personnel Safety in Disaster Environment, Hefei Institute of Public Security, Tsinghua University, Hefei Anhui 230601, China; 3 State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230026, China; 4 Beijing South Railway Station, China Railway Beijing Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: To quantitatively evaluate the particle matter barrier performance of different firefighter protective clothing, a test platform was established using a high-precision environmental chamber and a particle generation device. Aerosol mixtures of sodium chloride, dioctyl sebacate and titanium dioxide particles were released to simulate a smoke-filled fire environment. The inward leakage rate was calculated based on the particle matter concentration distribution inside and outside the garments, allowing a quantitative assessment of the particle matter barrier performance of 4 types of protective clothing. The results demonstrate that firefighting garments and emergency-rescue suits provide inadequate protection for the upper and lower extremities. The light-duty chemical protective coverall exhibits the best overall performance, with an average total inward leakage rate of 4.69%, representing a 92.4% reduction

* 文章编号:1003-3033(2026)03-0247-08; 收稿日期:2025-09-20; 修稿日期:2025-12-05

** 通信作者:刘小勇(1980—),男,江西吉安人,博士,正高级工程师,主要从事公共安全、检验检测研究。E-mail: liuxiaoyong@tsinghua-hf.edu.cn。

compared to the control group. It demonstrates excellent protective capability. However, all four types of protective clothing are ineffective at blocking small particles with diameters of 0.3–1.0 μm.

Keywords: firefighter protective suits; smoke environment; particulate matter; barrier performance; inward leakage rate; particle size

0 引言

火灾发生时伴随大量烟气产生,这些烟气大多数是可燃物不充分燃烧时产生的颗粒物^[1],当消防救援人员进入火场中,往往长时间处在高温和浓烟环境中,这些烟气颗粒物不仅能附着在消防员的防护装备上,甚至能穿透防护装备直接接触人体^[2],这些细微颗粒物其表面大多附着一些不完全燃烧的芳香烃类致癌物,且极易被皮肤吸收,极大程度增加消防员患癌的风险^[3]。国内现有的消防员防护服主要功能是热防护,保护消防员免受火场高温烧伤或烫伤,但忽略了火场烟气颗粒对消防员健康的潜在风险^[4]。目前,国内相关研究多集中于口罩和医用防护服的颗粒防护,而非消防员防护服的烟气颗粒防护。通过深入研究烟气颗粒物发现,在所有烟气颗粒物中,对人体造成危害最大的颗粒物是粒径 10 μm 以下的颗粒物^[5]。GAVIN 等^[6]在住宅火灾试验中进行区域空气采样,发现颗粒物侵袭是火灾调查工作中对人体健康最具危险性的因素。刘志坚等^[7]在全尺寸手术室中研究了 4 种医用防护服和 9 种运动组合下手术人员排放的气溶胶颗粒和微生物的数量。DOMAT 等^[8]在环境隔离试验室内研究了不同类型个人防护工作服和手套对氯化钠气溶胶的阻隔效率,量化了不同织物对人体的保护水平。王宏阳等^[9]通过模拟灭火防护服在火场暴露的烟气污染情形,研究了烟气颗粒在灭火防护服装上的附着方式以及各层面料间的污染特征,探讨了洗涤工艺对各层面料污染物的去除效率。国际上关于颗粒物防护的标准,文献[10]中强制要求消防服颗粒总向内泄漏率≤8%;文献[11]细化了头套/面料颗粒穿透限值;文献[12]以 200 mg 加载试验模拟了高粉尘环境,以评估呼吸防护设备在实际使用中的性能;文献[13]量化了化学防护服向内泄漏率;文献[14]引入了动态走步测试。文献[15]以氯化钠气溶胶静态测试来评估防护服对颗粒物的防护性能。这些标准要么针对“口罩或面料”要么不适用于其他类型的消防员防护服,缺乏袖口、裤脚等动态缝隙泄漏数据。因此,还待解决以下问题:①消防服动态运动下的泄漏率标准;②不同粒径颗粒的穿

透机制;③多组分颗粒物的协同渗透效应。

鉴于此,笔者拟运用高温环境仓和盐性气溶胶发生器搭建火场浓烟环境试验装置,并进行多工况试验,研究消防员防护服对火场烟气颗粒物的阻隔能力和对消防员的防护效果;运用向内泄漏率量化消防员防护服的颗粒物阻隔性能,以为消防员个体防护提供参考,为消防防护装备的研发和改进提供数据基础。

1 防护服颗粒物阻隔性能测试

1.1 防护服颗粒阻隔性能测试系统

测试系统由 5 个部分组成,包括高温环境舱、气溶胶发生器、气溶胶监测仪、人员活动平台和数据采集系统(图 1)。

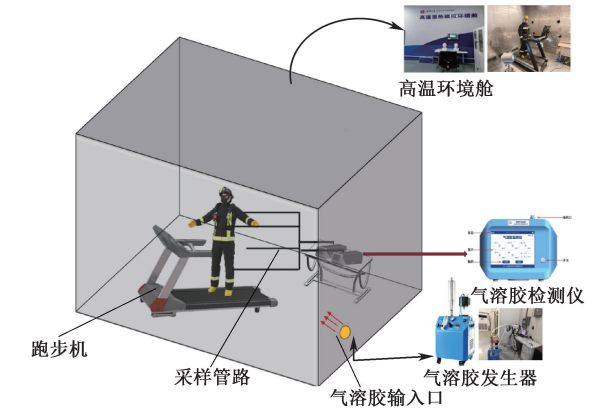


图 1 消防员防护服颗粒物阻隔性能测试平台

Fig. 1 Test platform for fire protection clothing particle barrier performance

采用高温环境舱为试验提供火场环境,其空间尺寸为 6 m×5 m×4.7 m,可控温范围为 20~80℃,相对湿度为 30%~95%,温控精度±0.5℃,湿度控制精度±2%,气流均匀性偏差<5%。颗粒物发生源为气溶胶发生器,流速为 100~120 L/min,颗粒物浓度可达 10~50 μg/L,输出气溶胶粒径为 0.02~10 μm,气溶胶组成成份有氯化钠颗粒(模拟烟尘核心),并掺入 10% 质量分数的食品级二甲酸二辛酯模拟有机碳组分和食品级二氧化钛纳米粉(质量分数为 0.1%)模拟重金属组分,混合气体经预热至 35℃后通入舱内。采用多通道气溶胶采集装置实

时采集舱内和被试服装内的气溶胶质量浓度数据,采样频率为3 s/次,测量精度为±2%。

1.2 阻隔性能试验样品

采用棉质长裤和长袖T恤衫作为基础服装,防护服采用消防队伍广泛配置的4种救援防护服^[16]:①灭火防护服;②抢险救援服;③避火服;④轻型防化服。试验服装如图2所示,每种服装包括4个平行试验样品,共16个样品。采用的防护服均满足国标《消防员灭火防护服》(GA10—2014),《防护服装 阻燃服》(GB 8965.1—2020),《消防员抢险救援防护服装》(GA 633—2006),《消防员化学防护服装》(GA770—2008)。



图2 试验服装
Fig. 2 Experimental clothing

1.3 防护服测试试验工况

高温环境舱温度为35℃,湿度为45%,气溶胶质量浓度为(500±10) μg/m³,模拟试验环境。设置穿着防护服和不穿着防护服(仅穿着基础服装)2种着装条件,以不穿着防护服为对照组,穿着灭火防护服、抢险救援服、轻型防化服和避火服为试验组,见表1。

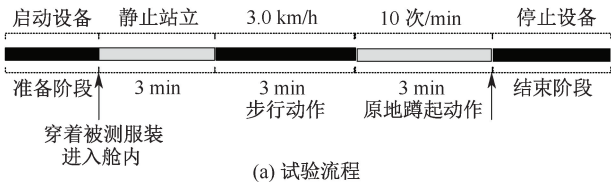
表1 试验工况
Table 1 Test conditions

工况编号	试验服装
1	基础服装
2	灭火防护服+基础服装
3	抢险救援服+基础服装
4	避火服+基础服装
5	轻型防化服+基础服装

1.4 防护服测试流程与取样点位

试验分为多个阶段,试验流程与取样点位如图3所示。试验开始前的准备阶段,被试先穿着紧身内衣,在进入舱室前穿着测试服装,测量被测防护服内部的颗粒物质量浓度,取样点设置在被试身体的3处部位,如图3b所示,检测并记录舱室内和被试防护服内的颗粒物质量浓度,确保其初始浓度不会对试验结果造成影响,启动气溶胶发生器,待舱室内气溶胶浓度达到稳定后试验正式开始。第1阶

段,被试穿着被测防护服在进入舱内保持静止站立动作3 min;第2阶段,被试以3.0 km/h的步行速度运动3 min;第3阶段,被试以10次/min的速度原地蹲起运动3 min。此后关闭气溶胶发生器,试验设备停止记录数据,被试离开舱室,脱下防护服装。整个试验流程模拟消防员救援作业的过程。



(a) 试验流程



(b) 取样点位

图3 试验流程与取样点位

Fig. 3 Experimental process and sampling points

1.5 试验人员

招募3名健康成年男性作为被试,平均年龄为(24±0.5)岁,平均体质量为(70.5±5.3) kg,平均身高为(177.2±1.8) cm,平均身体质量指数(Body Mass Index, BMI)为(22.4±1.3) kg/m²,选取的被试与消防人员情况基本一致。试验前24 h内,要求所有被试不吸烟、摄入咖啡因或酒精,也不要剧烈运动。当被试在试验过程中感到难以坚持时,他们有权利终止试验。同组服装的被试泄漏率变异系数<10%,组间差异通过重复测量方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)控制(当原假设为真时,出现“当前样本结果或更极端结果”的显著性概率p>0.05)。

2 防护服阻隔性能评价

2.1 阻隔性能表现评估流程

单项向内泄漏率在一定程度上可有效反映防护服某部分对颗粒物的阻隔水平^[17]。以空气动力学直径≤10 μm的颗粒物浓度测量对象,在试验开始到结束整个过程测量服装内各点位和外界的颗粒物

的质量浓度,根据下式计算单项向内泄漏率 L_{ijmn} :

$$L_{ijmn} = \frac{C_{ijmn}}{C} \times 100\% \tag{1}$$

式中: C_{ijmn} 为被测 i 穿着被测防护服 j 进行 m 试验动作时,在 n 位置取样测得的防护服内颗粒物质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; C 为检测仓环境内颗粒物质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

每项试验动作的平均总向内泄漏率 L_{Em} 和所有试验动作的平均总向内泄漏率 L_E 可有效反映某动作状态下和整个运动过程中防护服对颗粒物的阻隔水平,见下式:

$$L_{Em} = \frac{1}{jn} \sum_j \sum_n L_{ijmn} \tag{2}$$

$$L_E = \frac{1}{m} \sum_m L_{Em} \tag{3}$$

平均总向内泄漏率可有效反映不同防护服整装颗粒物的阻隔水平,其定义为试验后防护服装内部颗粒物的平均浓度与外部环境内颗粒物的平均浓度的比值^[18],见下式:

$$L = \frac{1}{jmn} \sum_j \sum_m \sum_n L_{ijmn} \tag{4}$$

式中 L_{ijmn} 为被测对象 i 穿着被测防护服 j 进行 m 试验动作时,在 n 位置取样测得的防护服单项向内泄漏率。

2.2 分级评价

鉴于所选每款样品服装样式和厂家存在明显差异,提出以对照组的平均总向内泄漏率数据为基准,利用降低比例 D 来描述消防员防护服颗粒物防护的有效性,当降低比例 $D > 50\%$ 时为有效防护, $\leq 50\%$ 时为无效防护,见下式:

$$D = \left(1 - \frac{L_{\alpha}}{L_{\beta}} \right) \times 100\% \tag{5}$$

式中: L_{α} 为对照组的平均总内项泄漏率; L_{β} 为试验组的平均总向内项泄漏率。

对防护服颗粒物防护性能分级,提出以对照组的所有试验动作的平均总向内泄漏率 L_E 为基准,利用防护效应量 d 对消防员防护服的颗粒物防护性能分级,见下式,性能表现分为 4 个等级,即优异、一般、良好和较差,具体分级指标要求见表 2。

$$d = \frac{L_{E\beta} - L_{E\alpha}}{\sigma_{\alpha}} \tag{6}$$

式中: $L_{E\beta}$ 为试验组服装的所有试验动作的平均总向内泄漏率; $L_{E\alpha}$ 为对照组服装的所有试验动作的平均总向内泄漏率; σ_{α} 为对照组服装的所有试验动

作的总向内泄漏率的总体标准差。

表 2 消防员防护服颗粒物阻隔性能等级

Table 2 Particle barrier performance grade of fire protection clothing

等级	效应量区间	阻隔性能描述
I (优异)	$d \geq 0.80$	显著优于对照,实际风险极低
II (良好)	$0.60 \leq d < 0.80$	明显优于对照,可满足火场需求
III (一般)	$0.20 \leq d < 0.60$	部分防护,高温浓烟环境受限
IV (较差)	$d < 0.20$	与对照无实质差异,不推荐浓烟作业

3 颗粒物阻隔性能结果分析与讨论

3.1 不同部位间单项向内泄漏率变化

试验过程中各类服装在下肢部位、上肢部位和躯干部位的单项向内泄漏率如图 4 所示。在第 1 阶段,被试处于静止站立状态,阶段初期,对照组、灭火防护服组、抢险救援服组轻型防化服组,4 组泄漏率的上升幅度接近,试验进行 2 min 后,各试验组和对照组的泄漏率曲线出现明显分层现象:对照组>抢险救援服组>灭火防护服组>避火服组>轻型防化服组。在图 4a 上肢部位,灭火防护服组和抢险救援服组的泄漏率曲线有较高重合,第 1 阶段阶段内 2 组最大差值为 1.25%,这是因为 2 组服装在袖口处都为开放式,存在与外界空气接触的缝隙,提高了颗粒物通过缝隙处向服装内泄漏的概率,反观避火服组和轻型防化组的上升趋势对比灭火防护服组与抢险救援服组有明显放缓现象,这是因为避火服在袖口处的密闭性和面料厚度高于这 2 组,阻碍了颗粒物向服装内泄漏,增幅最低的是轻型防化服组,第 1 阶段内增幅仅为 0.98%。这是因为其采用了连体式设计,上肢部位无接缝和缝隙,且面料材质能够有效隔绝颗粒物。

在第 2 阶段,被试处于 3.0 km/h 步行状态 3 min,对照组和各防护服组的泄漏率上升速率加大,泄漏率曲线分层现象明显加重,对照组颗粒物向内泄漏现象最为显著,其中下肢部在 6 min 处达到第 2 阶段内泄漏率最大值 73.83%,增幅为 52.73%;灭火防护服组、抢险救援服组与避火服组的泄漏率增幅相较于第 1 阶段有明显上升,这是因为被试的动作增大了服装与环境的接触面积且周围空气流动性,对比第 1 阶段显著增大,导致颗粒物更易穿透服装,

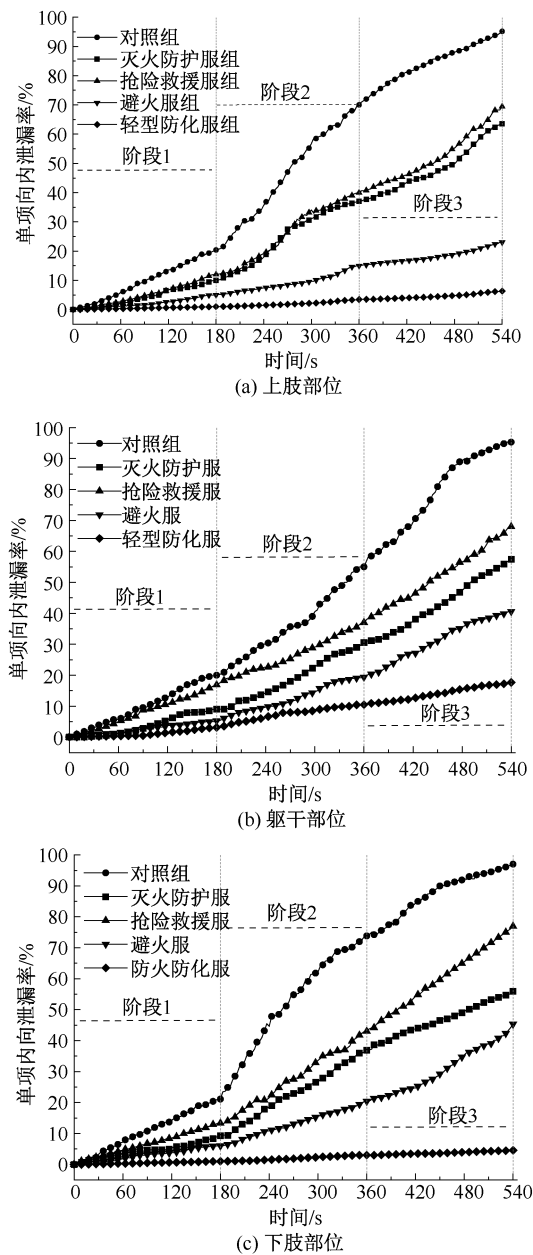


图4 各取样部位单项向内泄漏率

Fig. 4 Inward leakage rate of individual items at each sampling location

加速颗粒物向内泄漏。从图 4a 和图 4c 看出,灭火防护服组和抢险救援服组在上肢部位和下肢部位的向内泄漏率对比第 1 阶段有明显大幅上升情况,出现这种情况的原因,一方面是因为这 2 组服装在袖口处和裤脚处的密封程度不高,另一方面是因为步行动作中 2 处部位的活动性相比身体其他部位较高,导致颗粒物更容易通过此 2 处向服装内发生泄漏;而轻型防化服在躯干部位的颗粒物向内泄漏率对比上肢部位和下肢部位有明显的上升趋势,这是由于服装的拉链接缝处和面部有存在一定孔隙,造

成颗粒物向内泄漏情况发生。

在第 3 阶段,被试以 10 次/min 的速度做原地蹲起动作,此阶段各组的向内泄漏率相较于第 2 阶段有一定放缓迹象,但增幅仍高于第 1 阶段,出现这种情况,一方面是因为运动强度相较于第 2 阶段有所降低,另一方面经过第 2 阶段后,服装内的颗粒物浓度与外界的颗粒物浓度差值逐渐降低,压差也随之下降,导致颗粒物穿透速率降低,向内泄漏的发生态势放缓。从第 3 阶段试验结束时对照组和各防护服的各部位最终向内泄漏率看出,其向内泄漏率从高到低依次为:对照组>抢险救援服组>灭火防护服组>避火服组>轻型防化服组,其原因是灭火防护服的面料涂层和厚度与抢险救援服存在差异,而轻型防化服组的上升趋势最为缓和,抗向内泄漏能力最强,基于此,重新设计防护服袖口部位、使用阻隔性能好的面料涂层材料改进防护服。

3.2 不同防护服的防护效果与性能

所有服装的平均总向内泄漏率 L 如图 5 所示,4 种消防员防护服的降低比例 D 如图 6 所示。5 组防护服装中,平均总向内泄漏率呈显著差异:对照组高达 61.65%,约为灭火防护服的 2 倍;抢险救援服降幅仅 20.95%,对颗粒物阻隔效能不足,于火场浓烟环境难以形成有效屏障,鉴于其面料材质、服装厚度及结构设计上的局限,抢险救援服不宜用于高温浓烟下的救援场景;避火服、灭火防护服和轻型防化服组的平均总泄漏率 L 均低于 30%,且降低比例 D 都在 50% 以上,能在火场浓烟环境中对颗粒物起到一定阻隔作用,其中轻型防化服在各项测试中表现最好,平均总泄漏率 L 为 4.69%,降低比例高达 92.4%,是因为其面料主要由阻燃布双面涂覆氯

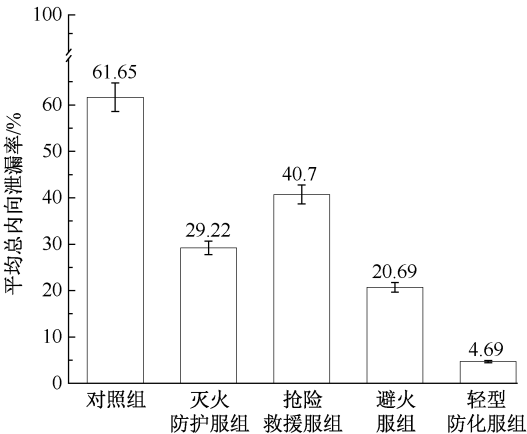


图5 平均总向内泄漏率

Fig. 5 Average total inward leakage rate

丁胶制成,具有出色的弹性、密封性和化学稳定性^[19]。

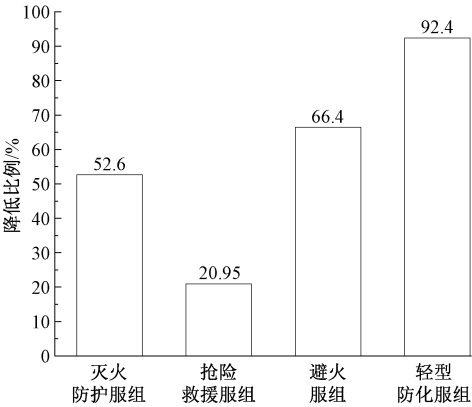


图6 消防员防护服总向内泄漏率降低比例

Fig. 6 Reduction ratio of total inward leakage rate of fire protection clothing

每项试验动作的平均总向内泄漏率 L_{Em} 如图7所示。从图7看出,静止站立动作状态下,对照组和试验组的平均向内泄漏均值均低于30%,且在每组动作中处于低位,其中轻型防化服的向内泄漏率在所有数据中最低,仅为1.85%,这是因为被测对象处于静止状态,环境中的颗粒物仅依靠布朗扩散做不规则运动向服装内泄漏,向内泄漏趋势较缓慢;在3 km/h 步行和10次/min 原地蹲起状态下对照组和试验组的平均向内泄漏对比静止站立状态下成倍数增长,其原因是运动的产生扰动了空气中的流场且增大了服装内外的压差与空气的接触面积,加剧了颗粒物向内泄漏情况发生。

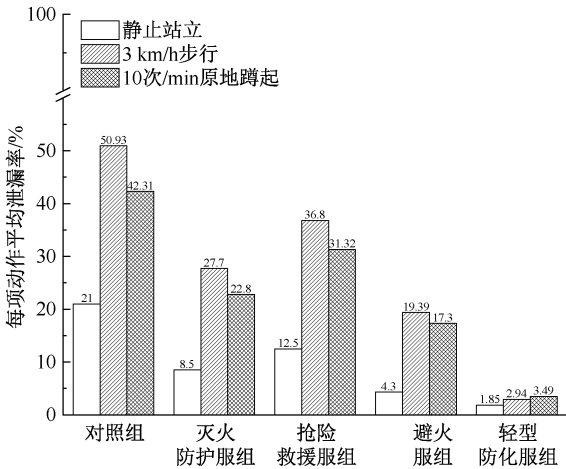


图7 每项试验动作的平均总向内泄漏

Fig. 7 Average total inward leakage of each experimental action

所有试验动作的平均总向内泄漏率 L_E 如图8

所示,从图8看出,各组消防员防护服装所有动作的平均向内泄漏率存在明显差异,其中抢险救援服组最高为27.86%,轻型防化服组最低为3.29%,其根本原因在于,不同防护服在面料材质、厚度及整装密封性方面存在显著差异,进而对颗粒物的穿透效率产生关键影响。防护效应量 d 如图9所示,由于抢险救援服无法起到有效防护,所以不适用防护服的颗粒物防护性能分级,由表2可知:灭火防护服的颗粒物阻隔性能表现一般,避火服的颗粒物阻隔性能表现良好,轻型防化服的颗粒物阻隔性能表现优异。

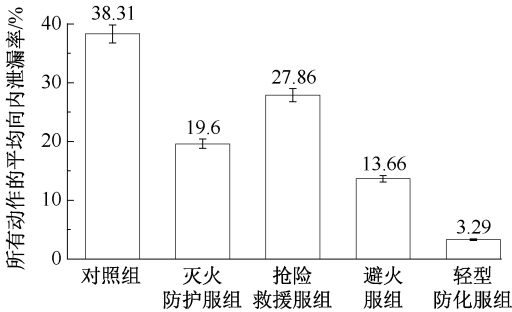


图8 所有试验动作的平均总向内泄漏

Fig. 8 Average total inward leakage of all experimental actions

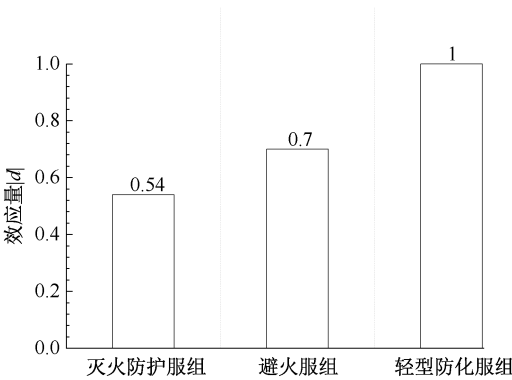


图9 消防员防护服防护效应量

Fig. 9 Protective effectiveness of firefighting protective clothing

3.3 颗粒物粒度分布分析

以每个试验阶段最后一组数据为基准,在不同测试动作过程中防护服内部的颗粒物粒径分布如图10所示。可以看出,在不同运动条件下,小粒径组(0.3~1.0 μm)的颗粒物占服装内部颗粒物的大部分,其原因是受服装面料材质和结构的限制,无法有效阻隔小粒径粒子,从图10b和图10c看出,灭火防护服、抢险救援服和避火服服装内部大粒径颗粒

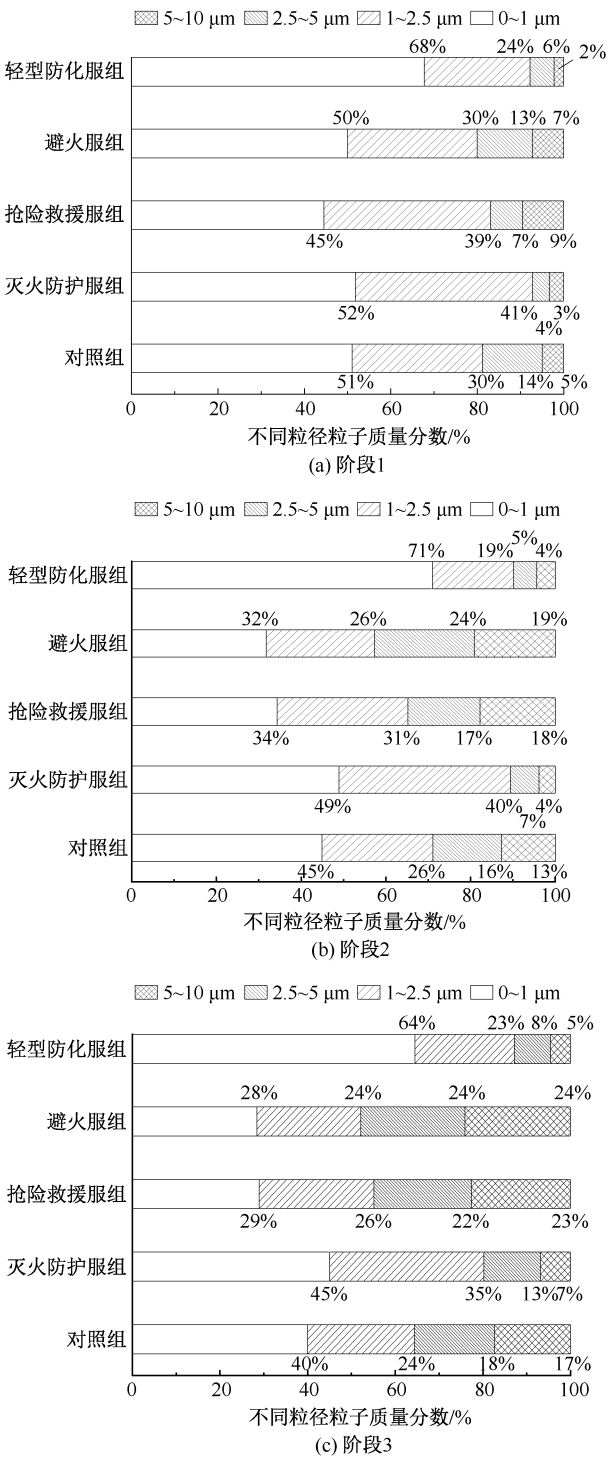


图 10 不同阶段内各防护服内颗粒物的粒度分布
Fig. 10 Particle size distribution of particles inside protective clothing at different stages

物占比对比静止站立阶段(图 10a)有明显提升,这是因为随着一定强度的运动发生,增大了服装与外界环境的接触范围,加速了大粒径粒子向服装内部泄漏,其中灭火防护服对比避火服和抢险救援服各粒径颗粒物占比波动范围较缓和;防火防化服 3 个阶段的数据差异不明显,可以看出,轻型防化服由于良好的密闭性和面料材质,对大粒径粒子起到有效阻隔作用。相比小颗粒,较大的颗粒尺寸具有更大的表面积,并且可能携带更多有毒有害的微生物,大粒径粒子浓度越高,消防救援人员受到伤害的潜在风险越高,基于此建议灭火防护服和避火服其面料选用孔隙率较低的材料。

4 结 论

- 1) 从消防员防护服在不同部位的阻隔效果来看,灭火轻型服和抢险救援服对上肢部位的防护效果表现一般,向内泄漏达到 71.3% 和 62.41%;避火服防护效果相对较好;轻型防化服表现最好,但在躯干部位的防护效果因为密封性的原因受一定程度的影响。
- 2) 4 种消防员防护服中,只有抢险救援服的降低比例低于 50%,无法有效阻隔颗粒物,灭火防护服的阻隔性能表现一般,避火服的阻隔性能表现良好,轻型防化服的阻隔性能优异。
- 3) 在对不同粒径的颗粒物阻隔表现中,4 种消防员防护服对小粒径(0.3~1.0 μm)的颗粒物防护效果表现都一般,但在粒径大于 5 μm 的颗粒物的防护效果中,轻型防化服表现最好,避火服和抢险救援服表现一般,灭火防护服表现相对较好。

参 考 文 献

[1] 李梅杰,崔辉,纪荷怡. 基于火灾烟气累积伤害的人员疏散研究[J]. 安全, 2022,43(9):37-42.
LI Meijie, CUI Hui, JI Heyi. Research on personnel evacuation based on fire smoke accumulation injury[J]. Safety & Security, 2022, 43(9): 37-42.

[2] 钱江瑞,张文欢,李俊. 消防灭火头盔颗粒防护性能影响因素及其测评方法[J]. 毛纺科技, 2023, 51(7):

126-133.

QIAN Jiangrui, ZHANG Wenhuan, LI Jun. Influence factors and evaluation methods of particle protection in firefighter hoods [J]. Woolen Textile Technology, 2023, 51 (7): 126-133.

- [3] KEALER R M, MAYER A F, KENETH W, et al. Effects of firefighting hood design, laundering and doffing on smoke protection, heat stress and wearability [J]. Ergonomics, 2021, 64(6): 11-13.
- [4] 刘烨, 王俊胜, 金星, 等. 消防员灭火防护装备研究进展[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(12): 1 636-1 646.
- LIU Ye, WANG Junsheng, JIN Xing, et al. Research progress of fire protection equipment for firefighters [J]. Fire Science and Technology, 2024, 43 (12): 1 636-1 646.
- [5] 杨耀, 邵阳, 张燕. 大气颗粒物的危害及其解析技术研究综述[J]. 北方环境, 2010, 22(5): 82-87.
- YANG Yao, TAI Yang, ZHANG Yan. Reviews of harms and analytic technique study of airborne particulates [J]. Northern Environment, 2010, 22 (5): 82-87.
- [6] HORN G, KERBER S, FENT K, et al. Research highlights the health impacts of fireground activities and exposure [J]. Firehouse, 2017, 42(5): 127-132.
- [7] ZHI Gianlin, HAI Yangle, MO Zhen, et al. Experimental study on the generation of aerosol particles and microorganisms from surgical staff in an operating room [J]. Building and Environment, 2023 134(5): 236-244.
- [8] DOMAT M, PLA J, CADAVID-R C M, et al. Experimental evaluation of the effectiveness offered by different types of personal protective clothing against nanoaerosols [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 838 (1): DOI: 10.1088/1742-6596/838/1/012021.
- [9] 王宏阳, 王俊胜, 薛岗, 等. 灭火防护服烟气污染及其洗消研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(1): 95-98.
- WANG Hongyang, WANG Junshen, XUE Gang, et al. Study on smoke pollution and decontamination of firefighting protective clothings [J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(1): 95-98.
- [10] ISO 13982-2:2004, Protective clothing for use against solid particulates [S].
- [11] GB 24539—2021, 防护服 化学防护服[S].
- GB 24539-2021, Protective clothing-chemical protective clothing[S].
- [12] KHANNA V. Latest international standards for firefighter suits-technical guidance and tests related to EN 469:2005 & NFPA1971:2007[J]. Fire Engineer, 2010, 35(1): 79-83.
- [13] ASTM F2299—2003, 利用胶乳球测定医用面具材料粒子渗透性初始效率的标准试验方法[S].
- ASTM F2299-2003, Standard test method for determining the Initial efficiency of materials used in medical face masks to penetration by particulates using latex spheres[S].
- [14] EUA. Services. NIOSH guide to the selection and use of particulate respirators certified under 42 CFR 84[S]. 1996.
- [15] EN ISO 17491-4-2008, 防护服. 对化学品的防护用衣服的试验方法 [S].
- EN ISO 17491-4-2008, Protective clothing-test methods for clothing providing protection against chemicals [S].
- [16] 崔琳琳. 现役消防服应用现状调研[J]. 北京服装学院学报: 自然科学版, 2015, 35(4): 50-55.
- CUI Linlin. Investigation on the application status of active firefighter's clothing [J]. Journal of Beijing Institute of Fashion Technology: Natural Science Edition, 2015, 35 (4): 50-55.
- [17] 赵阳. GB/T 29511—2013《防护服: 固体颗粒物化学防护服》解读 [J]. 中国个体防护装备, 2015(3): 29-33.
- ZHAO Yang. The interpretation of GB/T 29511 - 2013 *protective clothing: chemical protective clothing against solid particulates* [J]. China Personal Protective Equipment, 2015(3): 29-33.
- [18] BEN S M, HALLE S, TUDURI L. Efficiency of five chemical protective clothing materials against nano and submicron aerosols when submitted to mechanical deformations [J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2016, 13(6): 425-33.
- [19] 王俊胜, 金星, 张杰, 等. 高等级化学防护服用多层膜面料的阻燃性能和热防护性能 [J]. 消防科学与技术, 2024, 43(3): 389-392.
- WANG Junsheng, JIN Xing, ZHANG Jie, et al. Flame retardancy and thermal protection performance of multi-layer film fabric for high-level chemical protective clothing [J]. Fire Science And Technology, 2024, 43 (3): 389-392.

作者简介: 杨昕宇 (2001—), 男, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 主要研究方向为人员安全与个体防护方面。E-mail: yolande_yu@163.com。

