

# 一种新型氚防护服面料制备及性能研究

杨明明<sup>1,2,3</sup> 李国栋<sup>1,2,3</sup> 韩毅<sup>1,2,3</sup> 刘宇辰<sup>1,2,3</sup> 孙岩松<sup>1,2,3</sup> 沈华亚<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>(中国辐射防护研究院 太原 030006)

<sup>2</sup>(辐射安全与防护山西省重点实验室 太原 030006)

<sup>3</sup>(集团辐射防护技术重点实验室 太原 030006)

**摘要** 本研究设计并研制了一种新型氚防护服面料——PVC/EVA/PVDC/EVA/PVC复合面料，该面料以阻氚性能极佳的PVDC作为功能层，以与PVDC热性能匹配度较高的EVA为过渡层，以加工性能优异的PVC作为外层，利用共挤工艺和黏合工艺研制而成。新型面料对水蒸气的阻隔性能优异，其水蒸气透过量仅为放射性污染防护服面料（0.20 mm PVC）的1/7.3。通过面料接缝的阻隔性研究表明：黏合工艺、高频热合工艺制作的接缝的阻隔性能均优于无缝材料，主要渗透路径均为垂直渗透。通过新型面料的力学性能和柔软度测试表明：耐磨损性能、耐屈挠破坏性能、抗刺穿性能、抗撕裂性能和柔软度均满足使用要求，其中耐屈挠破坏性能、抗撕裂性能远高于标准要求。

**关键词** 氚防护服，复合材料，渗透性，接缝，力学性能，柔软度

**中图分类号** TL75<sup>+</sup>2.3

**DOI:** 10.11889/j.1000-3436.2025-0126

**CSTR:** 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0126

**引用该文:**

杨明明, 李国栋, 韩毅, 等. 一种新型氚防护服面料制备及性能研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2026, 44(3): 030201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0126.

YANG Mingming, LI Guodong, HAN Yi, *et al.* Preparation and performance study of a new type of tritium protective clothing fabric[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2026, 44(3): 030201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0126.



## Preparation and performance study of a new type of tritium protective clothing fabric

YANG Mingming<sup>1,2,3</sup> LI Guodong<sup>1,2,3</sup> HAN Yi<sup>1,2,3</sup> LIU Yuchen<sup>1,2,3</sup> SUN Yansong<sup>1,2,3</sup> SHEN Huaya<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

<sup>2</sup>(Shanxi Key Laboratory for Radiation Safety and Protection, Taiyuan 030006, China)

<sup>3</sup>(CNNC Key Laboratory for Radiation Protection Technology, Taiyuan 030006, China)

**ABSTRACT** This paper designs and develops a new type of tritium protective clothing fabric — a PVC/EVA/

基金资助: 国防预先研究课题 (50926080302)

第一作者: 杨明明, 女, 1989年10月出生, 2016年于中国辐射防护研究院获工学硕士学位, 辐射防护及环境保护专业, 从事辐射防护装备研究

通信作者: 韩毅, 硕士, 副研究员, E-mail: heaven0china@163.com

收稿日期: 初稿 2025-12-29; 修回 2026-04-25

Supported by the National Defense Pre-Research Project (50926080302)

First author: YANG Mingming (female) was born in October 1989, and obtained a master of engineering degree in 2016 from China Institute for Radiation Protection, majoring in radiation protection and environmental protection, engaged in research on radiation protection equipment

Corresponding author: HAN Yi, master's degree, associate researcher, E-mail: heaven0china@163.com

Received 29 December 2025; accepted 25 April 2026

PVDC/EVA/PVC composite fabric. This fabric uses PVDC, which has excellent tritium barrier properties, as the functional layer, EVA as the transition layer due to its high thermal compatibility with PVDC, and PVC as the outer layer for its superior processing performance. The fabric is manufactured using co-extrusion and bonding processes. The new fabric has excellent water vapor barrier properties, with its water vapor transmission being only 1/7.3 of times that of radioactive contamination protective clothing fabric (0.20 mm PVC). Studies on the barrier performance of fabric seams show that seams made by bonding and high-frequency thermal sealing processes have better barrier properties than seamless materials, with the main penetration path being vertical penetration. Tests on the mechanical properties and softness of the new fabric indicate that its abrasion resistance, flexural damage resistance, puncture resistance, tear resistance, and softness all meet usage requirements, with the flexural damage resistance and tear resistance significantly exceeding standard requirements.

**KEYWORDS** Tritium protective clothing, Composite materials, Permeability, Seam, Mechanical properties, Flexibility

**CLC** TL75\*2.3

氚作为关键的热核材料，在核武器研制、磁约束聚变和惯性约束聚变等领域均具有重要应用需求<sup>[1]</sup>。在涉氚作业环境中，氚一旦释放至环境，可通过同位素置换或氧化反应等途径，形成氚气（HT）、氚化水（HTO）、有机氚（OBT）等多种氚化物并弥散于空气。其中，氚化水占比高达99%以上。因此氚防护服的主要防护对象为氚化水蒸气。氚化水蒸气具有极强的渗透能力，且经呼吸道吸入后对人体危害显著，其累积有效剂量约为气态氚的 $2.5 \times 10^4$ 倍<sup>[2]</sup>。因此，氚防护服面料不仅需要具备优异的防氚渗透性能，还应兼顾优良的柔韧性、力学性能和加工可行性等综合要求<sup>[3]</sup>，高分子材料成为氚防护服面料的首选材料体系。在氯丁橡胶、聚乙烯（PE）和聚氯乙烯（PVC）等常用高分子材料中，PVC因加工性能优良、绝缘性好、抗裂、质轻、成本低廉且氚渗透率适中，自20世纪50年代起便被广泛应用于氚防护服制备。然而，PVC材料自身防护性能有限，传统应用中往往只能通过增加面料厚度的方式提升防护效果<sup>[4-5]</sup>，难以满足高性能、轻量化的现代防护要求。后期随着各种高分子材料的涌现，越来越多的高性能材料用于氚防护领域，其中，聚偏二氯乙烯（PVDC）因具备优异的防氚性能，成为氚防护领域的首选高分子材料之一。但该材料同时存在溶解性差、热稳定性不佳、加工成型困难等突出缺陷<sup>[6]</sup>，因此通常需要与其他材料进行复合改性以满足工程应用需求。在实际工程应用中，美国Savannah River工厂等核设施长期采用涤纶基布/CPE/EVA/PVDC复合涂层的防氚气衣方案；国内则以中国辐射防护研究院为核心，系统研发了以

PVDC、高密度聚乙烯（HDPE）、氯化聚乙烯（CPE）为原料，采用层压复合工艺制备出CPE/PVDC/HDPE/PVDC/CPE五层结构复合材料。该5层复合材料中，CPE作为保护层，PVDC作为核心阻隔层，HDPE作为结构增强层；其氚气渗透率降低至原传统PVC材料的1/70，阻隔性能得到显著提升，可有效满足氚防护工程的实际需求<sup>[7]</sup>。本研究利用共挤加工工艺，将具有优良防氚性能的PVDC作为功能层，结合其他高分子材料，研制了PVC/EVA/PVDC/EVA/PVC复合片材，并对其阻隔性、力学性能和柔软度进行了测试；此外，对面料接缝的阻隔性进行了研究。

## 1 面料设计研制

### 1.1 研究思路

本文基于共挤加工工艺，拟设计一种五层复合片材结构——以具备优异防氚性能的PVDC作为功能层，选取与PVDC热性能（熔融温度、熔体黏度等）匹配度较高的乙酸乙烯共聚物（EVA）<sup>[8]</sup>作为过渡层，同时采用加工性能优异的PVC作为外层，研制PVC/EVA/PVDC/EVA/PVC五层复合面料。为了确保材料的阻氚性能，先对PVC、EVA、PVDC三种材料的氚化水蒸气阻隔性能进行研究，在确保阻氚性能的基础上，以市售放射性污染防护服的面料厚度为参考，结合现有的共挤加工工艺对面料进行设计。

因目前国内没有成型的氚化水蒸气渗透性能测试装置，故采用同位素替代的方法对材料的氚化水蒸气阻隔性能进行初步评估。氢是氚的同位

素，其物理与化学性质同氚非常相似；不同材料对水蒸气的阻隔性能排序，与其对氚化水蒸气的阻隔性能排序具有一致性，且水蒸气渗透性测试比氚化水性能测试成本低，且不存在放射线危险，可初步进行大量实验以对高分子有机材料的氚化水蒸气阻隔性能进行评估。

## 1.2 PVC、EVA、PVDC阻隔性能研究

水蒸气在高分子材料中经过分子形式的吸附、溶解、扩散和解析等完成渗透过程，参考GB/T 26253—2010<sup>[9]</sup>，使用济南兰光机电技术有限公司生产的C301水蒸气透过率测试仪对样片进行测试，图1为C301水蒸气透过率仪测量原理图，上腔中浸泡过38℃下饱和硝酸钾溶液的陶瓷片可产生90%RH湿度的水蒸气，水蒸气通过试样渗透到下腔被持续输送的干燥氮气携带至红外传感器进

行探测。测量结果为水蒸气透过量WVT [g/(m<sup>2</sup>·24 h)] (渗透达平衡时，单位时间内透过单位面积样品的水蒸气量)，通过计算可以得到水蒸气渗透系数 $P_v$  [g·cm/(cm<sup>2</sup>·s·Pa)] (表征不同材质的水蒸气阻隔性能)，计算方法<sup>[10]</sup>如(1)式所示。

$$P_v = \frac{\Delta m \cdot d}{A \cdot t \cdot \Delta p} = \frac{WVT \cdot d}{\Delta p} \quad (1)$$

式中： $\Delta m$ 为质量变化，g； $A$ 为面积，m<sup>2</sup>； $t$ 为时间，h； $d$ 为试样厚度，cm； $\Delta p$ 为试样两侧的水蒸气压力差，Pa。

根据测试可知，材料的水蒸气渗透趋势相同，以0.2 mm的PVC片材进行说明，透过片材的水蒸气量随时间的变化关系如图2所示，由图可见材料的水蒸气透过量随着时间增加而增大直到达到稳态渗透。

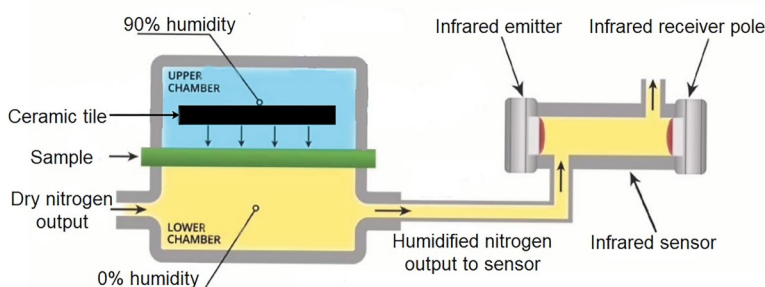


图1 C301水蒸气透过率测试仪  
Fig.1 C301 water vapor transmittance tester

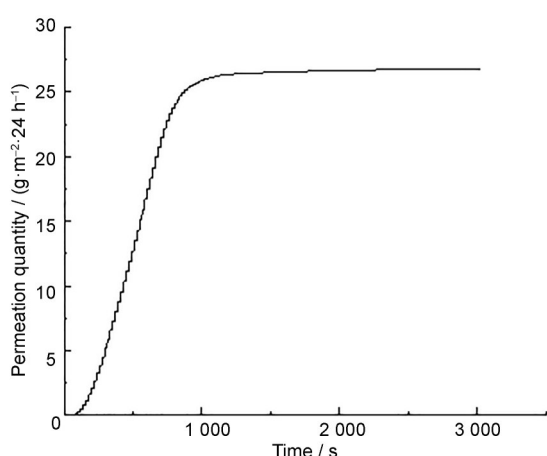


图2 0.2 mm PVC透水量随时间的变化关系  
Fig.2 Change of 0.2 mm PVC permeability with time

测试项及测试结果如表1和图3所示，可以明显看出各种材料水蒸气透过系数顺序为： $P_{v-PVDC} < P_{v-EVA} < P_{v-PVC}$ ，表明PVDC的阻隔性最优、EVA次

之、PVC最差。其中0.01 mm PVDC和0.40 mm PVC以及0.37 mm EVA的阻隔性能相当，这与PVDC的结构有关，PVDC是由偏二氯乙烯单体聚合而成，具有很强的分子间聚集性、高结晶度以及疏水性的氯原子，不会形成氢键，导致水分子在PVDC分子内难以移动和通过<sup>[11]</sup>。而PVC和EVA的分子间隙大而且结晶度低，所以水蒸气阻隔性均不如PVDC，同理，PVC和EVA的氚化水蒸气阻隔性均不如PVDC。

此外，通过对比发现，同种材料的水蒸气透过量随厚度的增加而降低，可见厚度越厚阻隔性能越好；同种材质不同厚度的PVDC、PVC、EVA水蒸气透过系数略有不同，偏差分别为3.9%~6.5%、5.7%~8.3%、4.4%~5.0%，这与材料生产时添加的各种助剂有关，比如0.2 mm的PVC为了增加材料的柔软度，添加了大量增塑剂，导致材料的阻隔性变差。

表1 不同高分子材料膜片的水蒸气透过系数  
Table 1 Water vapor permeability coefficient of different polymer membrane materials

测试材料 Test materials	厚度 / mm Thickness	水蒸气透过量 / (g·m <sup>-2</sup> ·24 h <sup>-1</sup> ) Water vapor transmission	水蒸气透过系数 / [10 <sup>-15</sup> ((g·cm)·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ·Pa <sup>-1</sup> )] Water vapor permeability
PVDC	0.01	11.6	2
	0.02	6.0	2
	0.03	3.6	2
	0.04	2.7	2
PVC	0.17	29.3	98
	0.20	26.7	1.1×10 <sup>2</sup>
	0.30	15.5	92
	0.40	11.9	94
EVA	0.15	25.3	75
	0.19	20.4	76
	0.28	14.9	82
	0.37	11.2	82

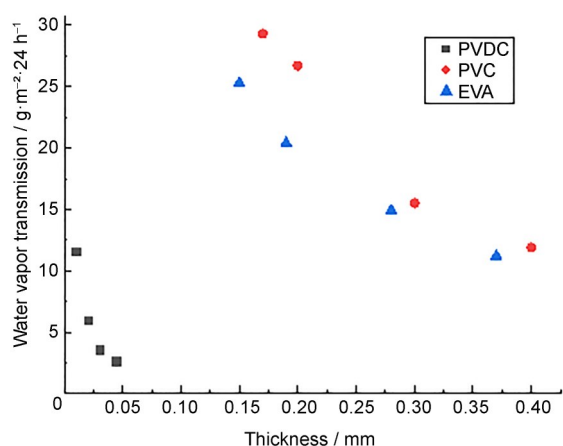


图3 不同厚度的PVDC、PVC、EVA的水蒸气透过量  
Fig.3 Water vapor transmission of PVDC, PVC, and EVA with different thicknesses

### 1.3 面料研制

#### 1.3.1 材料和试剂

PVDC: 巨化集团有限公司; PVC: 上海麦克林生化科技有限公司; 乙烯-醋酸乙烯共聚物 (EVA): 巨化集团有限公司; 黏合剂: 自制。

#### 1.3.2 面料设计加工过程

目前国内涉氡系统氡防护服常用放射性污染防护服替代, 一般采用0.2 mm左右的PVC面料, 轻而柔软, 穿着舒适性佳。为保证新型面料PVC/EVA/PVDC/EVA/PVC的舒适性, 总厚度也设置为0.2 mm, 根据现有共挤加工工艺条件, 平衡阻隔

性能与加工可行性, 先利用七层共挤吹膜机加工出共挤膜PVC/EVA/PVDC/EVA, 其中PVDC功能层设计为0.01 mm, 主要承担阻隔作用; 两侧EVA过渡层厚度均为0.02 mm, 实现层间良好黏合; 外层PVC厚度为0.07 mm, 较厚的PVC外层可有效保障材料整体的加工成型性能与结构稳定性。然后, 共挤材料与0.07 mm的PVC材料进行层压黏合得到新型面料, 具体制备工艺流程如图4所示。通过研制最终得到总厚度为0.20 mm的PVC/EVA/PVDC/EVA/PVC复合面料。

#### 1.3.3 新型面料的阻隔性能

通过测试得到新型面料的水蒸气透过量为3.6 g/(m<sup>2</sup>·24 h), 与研制所需材料的水蒸气透过量对比如图5所示。可见新型面料的水蒸气阻隔性能远优于目前0.20 mm PVC的氡防护服面料(约7.3倍), 以及0.30 mm、0.40 mm的加厚PVC面料。

新型面料的阻隔性能主要取决于PVDC层的阻隔性<sup>[8]</sup>, 这是由于PVC与EVA本身阻隔性较差, 且所用黏合剂为改性EVA, 其阻隔性能与EVA相近。新型面料PVDC层厚度仅为0.01 mm, 却远优于0.01 mm PVDC的阻隔性能, 而与0.03 mm的PVDC材料相近, 这是因为通过共挤技术可将分散相在集体中由灵位球状变为一维纤维状, 进而变形为二维片状结构。这种形态结构变化能够显著提高小分子透过薄膜时路径的曲折程度, 有效阻挡小分子的通过, 从而大幅度改善材料的阻隔性能<sup>[12]</sup>。

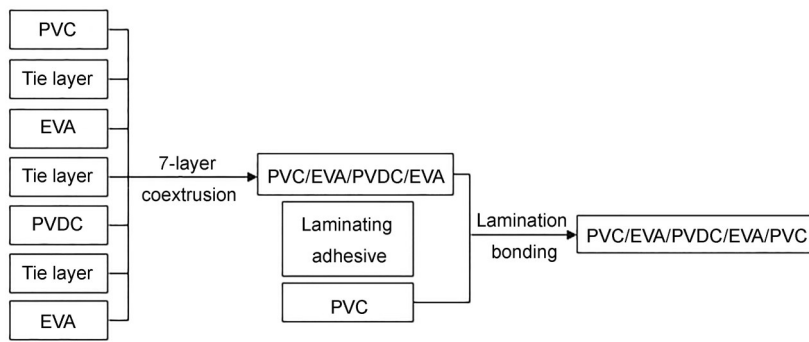


图4 面料制备工艺流程图  
Fig.4 Fabric preparation process flowchart

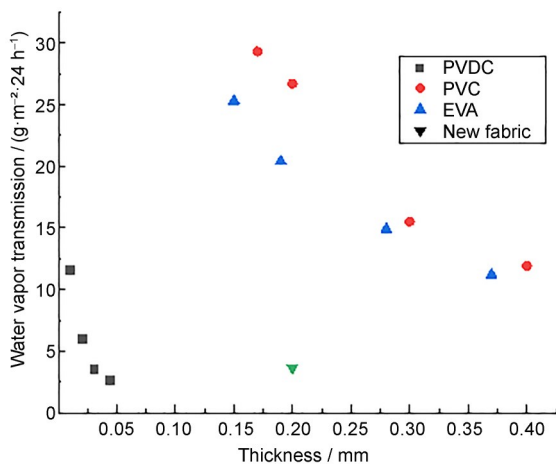


图5 新型面料与其他材料的水蒸气透过量对比  
Fig.5 Comparison of water vapor transmission between the new fabric and other materials

## 2 面料关键性能研究

### 2.1 接缝的阻隔性能研究

面料用作氚防护服时，会产生大量的接缝，氚化水蒸气渗透时，除了存在常规扩散外，还存在沿材料的空位团、微孔、气泡、裂纹、缝隙、毛细管，甚至非晶区的非常规扩散<sup>[13]</sup>。为了对接缝的阻隔性能进行验证，也通过水蒸气作为渗透介质进行评估。

防护服制作过程中常见的接缝加工方式有高频热合、黏合工艺等，其中高频热合的加工方式因具有高效、优质、精准、自动化程度高等优点而应用较为广泛；而黏合工艺的加工方式虽然灵活性好，可以适应不同形状和尺寸的制作要求，但是操作技术要求高、制作时间较长，不利于批量化生产。为了验证这两种接缝方式对新型面料阻隔性能的影响，通过高频热合和黏合工艺分别

按照图6接缝面料制作方法进行加工，其中接缝宽度参考防护服加工接缝为3 mm。

经过高频热合和黏合工艺所制作的接缝面料与无接缝面料的水蒸气透过量对比结果如表2所示。由表2可见，三种面料的氚阻隔性能由高到低依次为：黏合接缝面料>高频热合接缝面料>无接缝面料。将接缝处渗透方式建立模型如图7所示，主要包括垂直渗透和缝隙渗透两种途径，其中，缝隙渗透路径为热合/黏合宽度3 mm，垂直渗透路径相比较较短。高频热合接缝在加热与加压下作用下发生局部熔融压实，其垂直路径厚度略小于两层PVC总厚度 (<0.4 mm)；而黏合接缝因中间引入黏合层，垂直渗透路径厚度略大于两层PVC总厚度 (>0.4 mm)。经计算，缝隙渗透路径约为垂直渗透路径的7.5倍。结合实测结果可知黏合接缝和高温热合接缝的质量均较好，缝隙渗透对接缝阻隔性影响较小，因此缝隙渗透并非主要渗透路径，主要渗透路径仍为垂直渗透。

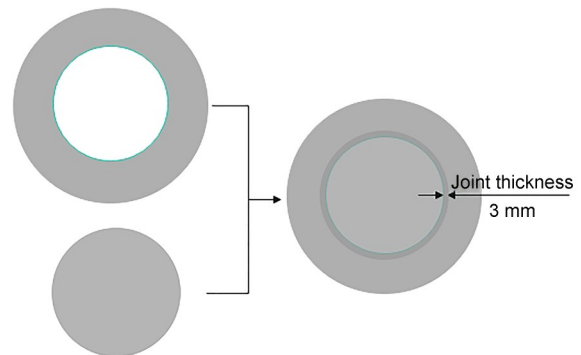


图6 接缝面料制作方法  
Fig.6 Seam fabric production method

黏合工艺对接缝片材无热损伤，且中间黏合层增大了垂直渗透路径；高频热合工艺则使接缝

处材料熔融融合，减小了垂直渗透路径；无缝面料仅为单层材料的垂直渗透。综上，黏合面料

的阻隔性能略优于高频热合面料，而高频热合面料的阻隔性优于无缝面料。

表2 接缝片材与原新型面料的水蒸气透过量对比  
Table 2 Comparison of water vapor transmission between seamed fabric and original new fabric

面料 Fabric	水蒸气透过量 Water vapor transmission / (g·m <sup>-2</sup> ·24 h <sup>-1</sup> )
无缝面料 Seamless fabric	3.6
高频热合接缝面料 High-frequency welded seam fabric	3.5±0.0
黏合接缝面料 Bonded seam fabric	3.4±0.1

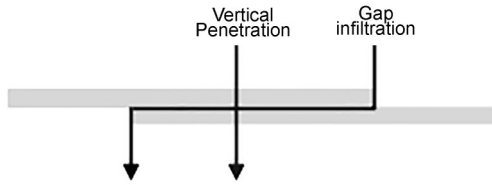


图7 接缝处渗透方式  
Fig.7 Seam penetration method

2.2 其他性能对比研究

2.2.1 性能测试及表征

力学性能。耐磨损性能测试：参考 GB/T 21196.2—2007<sup>[14]</sup>，使用山东卡斯特仪器有限公司生产的 KST401B 马丁代尔耐磨试验仪进行测试。耐屈挠破坏性能测试：参考 GB/T 12586—2003<sup>[15]</sup>，使用山东卡斯特仪器有限公司生产的 KST246-1 耐屈挠试验机进行测试。抗刺穿性能、抗撕裂性能：分别参考 GB/T 20655—2006<sup>[16]</sup>、GB/T 3917.3—2009<sup>[17]</sup>，使用深圳三思试验设备有限公司生产的 UTM15504 万能力学试验机进行测试。

柔软度。参考 GB/T 8942—2018<sup>[18]</sup>，使用泉州市美邦仪器有限公司生产的 NW254 柔软度测试仪

对样品进行测试。测试结果具有材料的相对比较意义，为试样本身的抗弯曲力和试样与缝隙处摩擦力的最大矢量之和 (mN)。

2.2.2 力学性能

氡防护服作为保护工作人员免受外部环境伤害的重要装备，其面料的力学性能是否达标直接关系到穿戴者的安全与健康，GB/T 41144—2021<sup>[19]</sup> 规定了放射性污染防护服应具备足够的抗刺穿性、抗撕裂强度、耐磨性等力学性能，以应对各种复杂环境和风险。为了验证面料的力学性能是否达到标准要求，并与市面上常见的气衣和防化服面料进行对比。

由表3可知，研制面料的力学性能均满足标准要求，其中耐屈挠破坏性能、抗撕裂性能远高于标准要求；与另外两种防护服面料对比，其抗撕裂性能最优，具有较强的抵抗外力撕裂的能力；抗刺穿性能处于中间水平，虽不及抗撕裂性能突出，但仍能提供一定的刺穿防护；耐屈挠破坏性能最差，更容易因反复弯曲或折叠而受损，但满足使用需求。

表3 三种防护服面料的力学性能测试和标准要求  
Table 3 Mechanical property testing and standard requirements for three types of protective clothing fabrics

测试面料 Test fabric	气衣面料 Gas-proof fabric	防化服面料 Chemical protective clothing fabric	研制面料 Develop fabrics	标准要求 Standard requirements
材质 Material	PVC	PVC 双面涂覆织物材料 PVC double-coated fabric material	PVC/EVA/PVDC /EVA/PVC	/
耐磨损性能 Wear resistance	2级 Level 2	3级 Level 3	3级 Level 3	至少1级 At least level 1
耐屈挠破坏性能 Resistance to flexural failure	6级 Level 6	6级 Level 6	4级 Level 4	至少1级 At least level 1
抗刺穿性能 Puncture resistance performance	14.1	38.5	14.8	>10 N
抗撕裂性能 Tear resistance	10.5	18.5	33.1	>10 N

### 2.2.3 柔软度

面料的柔软度直接影响防护服的穿着舒适性，主要体现在穿脱难易程度与作业灵活性。针对研制面料、气衣面料和防化服面料进行柔软度测试，实验条件设定为：狭缝宽度20 mm，板状测头平均行进速度1.2 mm/s，试样压入深度8 mm。经测试结果分别为260.9 mN、54.6 mN、454.1 mN。可见，样片的柔软度比PVC防护服的面料略硬，但是比市面上常见的防化服面料柔软得多，满足使用要求。

## 3 结论

(1) 依据不同厚度的PVDC、PVC、EVA的水蒸气阻隔性能，对阻氚面料进行设计，并参考市售放射性污染防护服的面料厚度，结合现有的共挤加工工艺，研制了厚度为0.2 mm的PVC/EVA/PVDC/EVA/PVC五层阻氚面料。经测试表明新型面料的阻隔性约为放射性污染防护服面料(0.2 mm PVC)的7.3倍。(2) 防护服接缝的阻隔性对防护服整衣的防护效果起着至关重要的作用，通过研究表明黏合工艺、高频热合工艺制作的接缝的阻隔性能均优于无缝材料，主要渗透路径均为垂直渗透。(3) 面料的力学性能和柔软性均满足使用要求，其中耐屈挠破坏性能、抗撕裂性能远高于标准要求。

**作者贡献声明** 杨明明负责文献收集和论文撰写；李国栋负责指导论文撰写；韩毅负责文献收集；刘宇辰负责指导论文修改；孙岩松负责氚防护服性能要求指导；沈华亚负责测试。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

### 参考文献

- 1 蒋国强, 罗德礼, 陆光达, 等. 氚和氚的工程技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-20.  
JIANG Guoqiang, LUO Deli, LU Guangda, *et al.* Tritium and tritium engineering technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 1-20.
- 2 杨怀元. 氚的安全与防护[M]. 北京: 原子能出版社, 1996: 112.  
YANG Huaiyuan. Tritium safety and protection[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1996: 112.
- 3 Fuller T P, Easterly C E. Tritium protective clothing[J]. 1979. DOI: 10.2172/5894839.
- 4 Butler H L, Van Wyck R W. Integrity of vinyl plastic suits in tritium atmospheres[J]. Health Physics, 1959, 2(2): 195-198. DOI: 10.1097/00004032-195904000-00009.
- 5 Patel B, Campling D C, Macheta P, *et al.* Health physics aspects of tritium operation at JET[J]. Fusion Engineering and Design, 1999, 47(2/3): 267-283. DOI: 10.1016/S0920-3796(99)00086-1.
- 6 唐梦. 老化对聚偏二氯乙烯保鲜膜结构与性能的影响[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.  
TANG Meng. Effect of aging on structure and properties of polyvinylidene chloride fresh-keeping films[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019.
- 7 游国强, 刘占旗, 张文字, 等. 防氚高分子复合材料的制备及其性能[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2016, 34(3): 030305. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2016.rj.32.030305.  
YOU Guoqiang, LIU Zhanqi, ZHANG Wenyu, *et al.* Preparation and properties of polymer composite materials for tritium[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2016, 34(3): 030305. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2016.rj.32.030305.
- 8 赵新峰, 徐辉. PVDC层压复合耐高温蒸煮袋及PVDC五层共挤流延技术的进展[J]. 塑料包装, 2007, 17(1): 44-49. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9828.2007.01.008.  
ZHAO Xinfeng, XU Hui. Development of PVDC laminated composite high temperature resistant retort pouch and PVDC five-layer co-extrusion casting technology[J]. Plastics Packaging, 2007, 17(1): 44-49. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9828.2007.01.008.
- 9 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 塑料薄膜与薄片水蒸气透过性测定 红外检测器法: GB/T 26253—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics - Film and sheeting - Determination of water vapour transmission rate - Infrared detection method: GB/T 26253—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- 10 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法: GB/T 1037—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics - Film and sheeting - Determination of water

- vapour transmission properties - Cup gain and loss method: GB/T 1037—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- 11 周榆凯. 基于PVC/PVDC共混平板膜的亲水改性及其结构和过滤性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.  
ZHOU Yukai. Study on hydrophilic modification of PVC/PVDC blend flat membranes and their structure and filtration properties[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023.
  - 12 郭金强, 王富玉, 张玉霞. 高阻隔高分子材料研究进展[J]. 中国塑料, 2021, 35(5): 146-155. DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2021.05.022.  
GUO Jinqiang, WANG Fuyu, ZHANG Yuxia. Research progress in polymeric materials with high barrier performance[J]. China Plastics, 2021, 35(5): 146-155. DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2021.05.022.
  - 13 山常起, 吕延晓. 氚及防氚渗透材料[M]. 北京: 原子能出版社, 2005: 120-135.  
SHAN Changqi, LYU Yanxiao. Tritium and tritium permeation resistant materials[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005: 120-135.
  - 14 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品 马丁代尔法织物耐磨性的测定 第2部分: 试样破损的测定: GB/T 21196.2—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Textiles - Determination of fabric abrasion resistance using Martindale method - Part 2: Determination of specimen breakage: GB/T 21196.2—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
  - 15 国家质量监督检验检疫总局. 橡胶或塑料涂覆织物耐屈挠破坏性的测定: GB/T 12586—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Rubber- or plastic-coated fabrics - Determination of resistance to flex cracking: GB/T 12586—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
  - 16 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 防护服装 机械性能 抗刺穿性的测定: GB/T 20655—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Protective clothing - Mechanical properties - Determination of resistance to puncture: GB/T 20655—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
  - 17 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品 织物撕破性能 第3部分: 梯形试样撕破强力的测定: GB/T 3917.3—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Textiles - Tear properties of fabrics - Part 3: Determination of tear force using trapezoidal test specimens: GB/T 3917.3—2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.
  - 18 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纸 柔软度的测定: GB/T 8942—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Paper - Determination of softness: GB/T 8942—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
  - 19 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纸 柔软度的测定: GB/T 8942—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Paper - Determination of softness: GB/T 8942—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.