

环境试验与观测

# 伪装遮障材料耐老化性能与机理分析

姜河<sup>1</sup>, 冯典英<sup>2</sup>, 张洋<sup>1</sup>, 赵寰<sup>3</sup>, 安琪<sup>2\*</sup>

(1.驻南京地区军事代表局, 南京, 210024; 2.山东非金属材料研究所, 济南, 250031;  
3.驻济南地区军事代表室, 济南, 250031)

**摘要:** **目的** 研究伪装遮障材料在实用期的老化机理, 获悉伪装遮障材料失效的主要环境因素。**方法** 通过分析伪装遮障材料在自然环境和实验室单因素环境中的性能变化, 得出影响伪装遮障材料老化失效的主要因素。采用扫描电子显微镜、红外光谱仪、X 射线光电子能谱仪表征材料的微观形貌、化学结构和化学成分变化, 解释伪装遮障材料的老化机理。**结果** 获得了在不同自然环境、实验室单因素环境下, 伪装遮障材料颜色外观和力学性能的变化规律, 得到了伪装遮障材料在老化过程中发生的微观形貌、化学结构和化学成分变化。**结论** 伪装遮障材料在西双版纳自然环境下的老化程度最大, 在济南自然环境下的老化程度最小。光照是导致伪装遮障材料颜色外观及力学性能降低的主要因素。老化过程中, 主要是材料表面的聚氨酯发生老化、脱落, 导致材料的力学性能下降。伪装遮障材料破坏时, 纤维有 2 种失效形式, 一种是纤维脱黏、直接断裂; 另一种是纤维脱黏, 拔出, 或者拔出过程中断裂。

**关键词:** 伪装遮障材料; 自然环境; 实验室环境; 颜色外观; 力学性能; 老化机理; 失效形式

中图分类号: TG335.86

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)02-0129-08

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2024.02.017

## Aging Characteristic and Mechanism of Camouflage Materials

JIANG He<sup>1</sup>, FENG Dianying<sup>2</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>, ZHAO Huan<sup>3</sup>, AN Qi<sup>2\*</sup>

(1. Military Representative Bureau in Nanjing, Nanjing 210024, China; 2. Norinco Group 53<sup>rd</sup> Institute, Jinan 250031, China;  
3. Military Representative Office in Jinan, Jinan 250031, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the aging mechanism of camouflage materials in the practical period, and learn the main environmental factors of the failure of camouflage materials. The main factors affecting the aging failure of camouflage materials were obtained by analyzing the performance changes of camouflage materials in natural environment and laboratory single factor environment. Scanning electron microscope (SEM), infrared spectrometer and X-ray photoelectron spectroscopy were used to characterize the changes in the microstructure, chemical structure and chemical composition of the materials, and to explain the aging mechanism of the camouflage materials. The color, appearance and mechanical properties of the camouflage materials under different natural environments and single factor environment in laboratory were obtained. The changes of microstructure, chemical structure and chemical composition of camouflage materials during aging were obtained. The

收稿日期: 2023-11-12; 修订日期: 2023-11-23

Received: 2023-11-12; Revised: 2023-11-23

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目 (JSHS2019209C001, JSHS20192074B001, JSHS2020209B001-5)

Fund: The Nation Defense Technology Foundation Project (JSHS2019209C001, JSHS20192074B001, JSHS2020209B001-5)

引文格式: 姜河, 冯典英, 张洋, 等. 伪装遮障材料耐老化性能与机理分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(2): 129-136.

JIANG He, FENG Dianying, ZHANG Yang, et al. Aging Characteristic and Mechanism of Camouflage Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 129-136.

\*通信作者 (Corresponding author)

aging degree of camouflage materials in Xishuangbanna is the highest and the aging degree is the lowest in Jinan natural environment. Illumination is the main factor that leads to the decline of color and mechanical properties of camouflage materials. During the aging process, the main reason is that the polyurethane on the surface of the material becomes aged and comes off, which leads to the decline of the mechanical properties of the material. When the camouflage materials are damaged, the fiber failure forms are as follows: one is the fiber direct fracture and the other is that the fiber is pulled out, or breaks during pull-out.

**KEY WORDS:** camouflage materials; natural environment; laboratory environment; color & appearance; mechanical properties; aging mechanism; failure form

高科技条件下局部战争的重要特征之一是超视距非接触作战,为适应这种作战模式的变化,世界各国将侦察探测技术、精确打击技术作为优先发展的军事技术进行研究,并在军事装备中大量应用,使现代战争表现出“战场日益透明”和“发现及摧毁”等特点<sup>[1-7]</sup>。战争实践证明,在作战中,采取有效的伪装技术,是提高军队生存能力和战斗力的必要手段<sup>[8]</sup>。伪装遮障材料是实现伪装技术的最重要途径之一,但其在气候环境下随时间推移而老化失效,从而导致伪装实用效果降低,甚至丧失。目前,关于伪装遮障材料老化性能评估方面的研究较少,因此对伪装遮障材料的实用期评估是亟待解决的问题。伪装遮障材料的主要失效行为表现在外观颜色的变化,使表现的伪装性能下降和力学性能下降。因此,本文主要选择某典型伪装遮障材料的光泽度、颜色和撕破强力等为评估指标。

济南、厦门、西双版纳3个地区代表了我国几种典型的气候环境。本文主要研究典型伪装遮障材料在这3个地区的自然老化,并与实验室环境下氙弧灯光老化、盐雾、湿热等单因素加速老化进行对比<sup>[9-10]</sup>,分析光泽、色差和撕裂强力的变化规律,明确不同地区自然环境下的老化差异,确定影响伪装遮障材料老化的主要因素。结合扫描电子显微镜、红外光谱分析仪,分析老化过程中伪装遮障材料的微观结构变化,阐明伪装遮障材料老化机理<sup>[11-14]</sup>。

## 1 试验

### 1.1 试样制备

本试验采用某典型伪装遮障材料制备试验样品,基材为纤维混合纺织布,涂层的主要成分为聚氨酯树脂和颜料。根据 GB/T 3917—2009 制备撕破强力试样。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 自然环境试验

大气暴露试验:根据 GB/T 9276—1996 进行,将曝露架面向赤道,并与地平线呈 45°角暴露于自然环境中。自然环境分别为济南、厦门、西双版纳地区。

取样周期分别为暴露第 3、6、9、12 个月。

#### 1.2.2 实验室环境试验

氙弧灯光老化试验:根据 GB/T 1865—2009 进行,采用光照 102 min 和喷淋 18 min 循环运行模式,辐照强度为 0.51 W/m<sup>2</sup>@340 nm。

盐雾试验:根据 GB/T 1771—2007 进行,试验箱和饱和器温度为 35 ℃,平均盐雾沉降量 1.6 mL/(h·80 cm<sup>2</sup>)。

湿热试验:根据 GB/T 1740—2007 进行,试验温度为 47 ℃,试验湿度为 95%。

光老化、盐雾试验取样周期间隔为 100 h,共计 10 个周期;湿热试验取样周期间隔为 200 h,共计 5 个周期。

## 1.3 性能检测

根据 GB/T 9754—2007,使用光泽度计(JKGZ-60 型,科信仪器公司),采用 60°几何条件测量试样的光泽度。根据 GB/T 11186—89,采用分光测色仪(YS3020 型,深圳市三恩时公司)测量试样的色差。根据 GB/T 3917—2009,采用万能材料试验机(Instron-5966 型,INSTRON 仪器公司)测量试样的撕破强力学性能。采用扫描电子显微镜(GEMINI 300 型,ZEISS 公司)观察试样的微观结构和断口形貌。采用傅里叶变换红外光谱仪(SPECTRUM-400M 型,PE 公司)测量试样的红外光谱图。采用 X 射线光子能谱仪(ESCALAB Xi+型,Thermo Scientific 公司)检测试样化学成分变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 在自然环境老化条件下的性能变化

#### 2.1.1 光泽度变化

伪装遮障材料在不同的自然环境老化条件下,光泽度保留率变化不同,如图 1 所示。可以看出,在济南和厦门地区,伪装遮障材料的光泽度总体变化较小,变化趋势平缓。在西双版纳地区,伪装遮障材料的光泽度下降明显,变化趋势先急后缓。

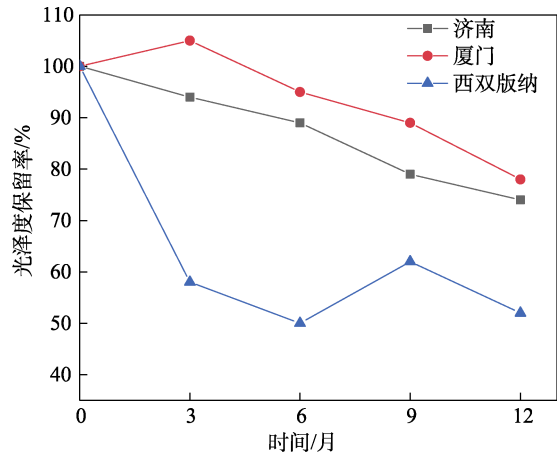


图 1 伪装遮障材料在不同自然环境下的光泽保留率  
Fig.1 Change of gloss retention of camouflage materials under different environment

2.1.2 颜色变化

伪装遮障材料在不同自然环境老化条件下颜色的变化曲线如图 2 所示。可以看出,在济南、厦门、西双版纳 3 个地区的自然环境下,伪装材料的色差均随着老化试验周期的增加而增大。但在增长趋势上有所不同,伪装遮障材料在厦门和西双版纳自然环境老化条件下色差增长速度较快,颜色变化较为明显。在济南地区,伪装遮障材料的色差增长缓慢,轻微变色。

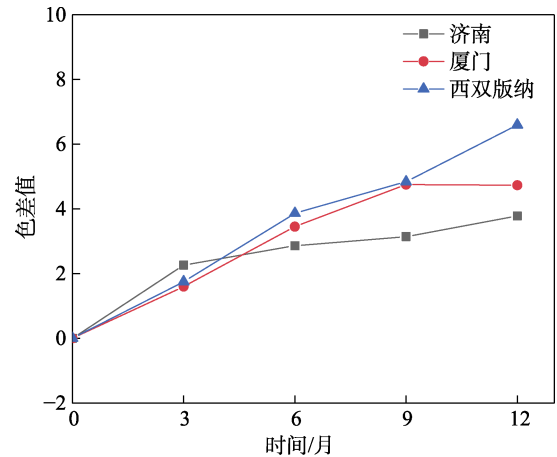


图 2 伪装遮障材料在不同自然环境下的颜色变化  
Fig.2 Change of color of camouflage materials under different environment

2.1.3 力学性能变化

伪装遮障材料在不同自然环境老化条件下力学性能的变化曲线如图 3 所示。可以看出,在济南、厦门、西双版纳自然环境老化条件下,伪装遮障材料的撕破强力有着不同程度的下降。在济南地区,完整试验周期内,伪装遮障材料的撕破强力始终保持着平稳的下降趋势。在厦门地区,第 3 个月和第 6 个月,伪装遮障材料的撕破强力下降平缓,第 9 个月下降趋势加快,第 12 个月撕破强力略有回升。在西双版纳地区,第 3 个月和 6 个月下降明显,第 9 个月略有回升,第

12 个月继续下降。济南、厦门和西双版纳地区样品力学性能整体呈下降趋势。相比较于厦门和西双版纳地区,济南地区伪装遮障材料的撕破强力保留率远高于其他 2 个地区。

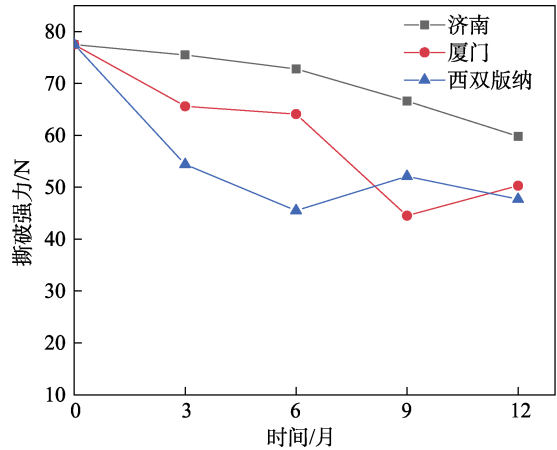


图 3 伪装遮障材料在不同自然环境下力学性能的变化  
Fig.3 Change of mechanical property of camouflage materials under different environment

2.2 在实验室环境加速老化条件下的性能变化

2.2.1 光泽度变化

伪装遮障材料在不同实验室环境老化条件下光泽度的变化曲线如图 4 所示。光老化、盐雾老化、湿热老化进行前期,伪装遮障材料的光泽度均有不同程度的上升。这是因为此时段内,伪装遮障材料中的树脂老化早期有进一步完全交联反映的趋势,使树脂表面变得光滑平整,使得试样的光泽度有所提升。随着试验继续进行,伪装遮障材料的光泽度呈现出下降的趋势,其中光老化试验条件下伪装遮障材料光泽度的下降程度最大,盐雾老化和湿热老化条件下伪装遮障材料光泽度的下降程度较小。

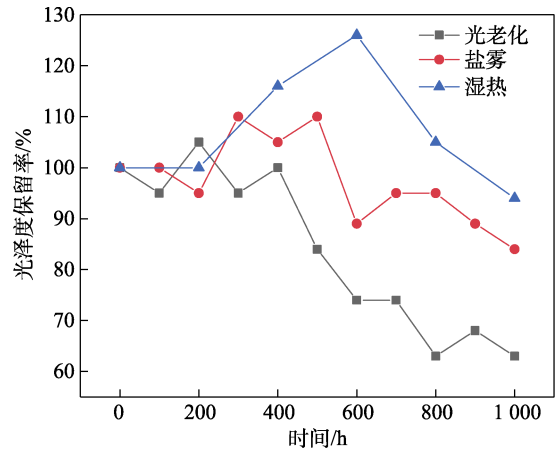


图 4 伪装遮障材料在不同实验室环境下光泽度保留率的变化  
Fig.4 Change of gloss retention of camouflage materials under different laboratory environment

### 2.2.2 颜色变化

伪装遮障材料在不同实验室环境老化条件下颜色的变化曲线如图5所示。可以看出,光老化试验条件下伪装遮障材料的色差最大,且呈现平稳上升趋势。盐雾试验条件下,伪装遮障材料的色差先是快速增加,后逐渐平稳。湿热试验条件下,伪装遮障材料的色差始终保持在平稳状态。在颜色变化程度大小方面,光老化条件下伪装遮障材料的颜色变化远大于盐雾条件和湿热条件。

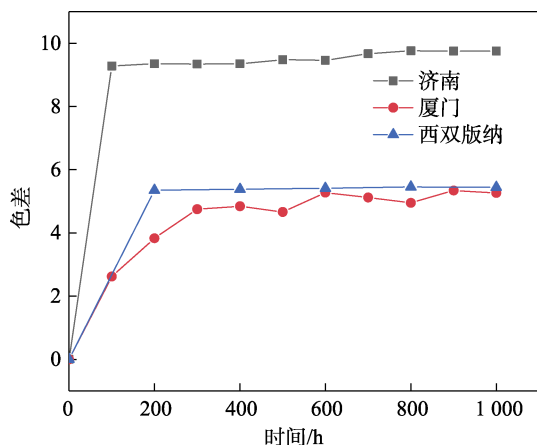


图5 伪装遮障材料在不同实验室环境下的颜色变化  
Fig.5 Change of color of camouflage materials under different laboratory environment

### 2.2.3 力学性能变化

伪装遮障材料在不同实验室环境老化条件下力学性能的变化曲线如图4所示。可以看出,伪装遮障材料的撕破强力在3种实验室环境下老化后,均呈现出不同程度的下降。湿热老化在进行到600 h时,力学性能略有提高,主要原因是样品中的聚氨酯树脂随着时间推移得到更完全的固化<sup>[14-15]</sup>。光老化、盐雾老化2种实验室环境老化条件下,试样的力学性能随着试验进行逐渐下降。试样在光老化试验条件下,撕破

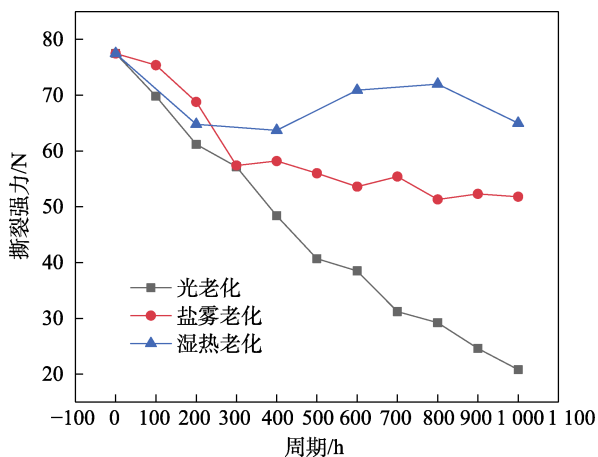


图6 伪装遮障材料在不同实验室环境下的力学性能变化  
Fig.6 Change of mechanical property of camouflage materials under different laboratory environment

强力的下降程度远高于盐雾试验和湿热试验,且在湿热条件下撕破强力的下降程度最小。

根据光老化、盐雾、湿热等实验室环境下伪装遮障材料的光泽度、颜色和力学性能变化程度可知,光照因素是影响伪装遮障材料外观和力学性能的主要因素,盐雾、湿热因素是次要因素。西双版纳地区的辐照强度大,温湿度高;厦门地区的辐照较大,盐雾因素起到一定作用;济南辐照强度较小,受湿热、盐雾的影响也比较小。根据伪装遮障材料在济南、厦门、西双版纳地区不同自然环境老化条件下光泽度、颜色和力学性能的变化,可知伪装遮障材料性能受不同自然环境老化影响程度的大小关系:济南<厦门<西双版纳。西双版纳和厦门地区的湿热程度也高于济南地区,因此温湿度对于伪装遮障装备老化具有一定影响。自然环境中,光照作为主要因素,湿热因素作为次要因素,二者复合作用是导致伪装遮障材料老化的重要原因。

## 2.3 老化机理分析

由于光照是影响伪装遮障材料老化的主要因素,使用扫描电子显微镜和红外光谱仪检测原始试样和光老化1 000 h试样的微观结构,比较分析光老化前后试样的微观形貌和化学结构变化,解析伪装遮障材料老化机理。

### 2.3.1 微观形貌

使用扫描电子显微镜拍摄伪装遮障材料的微观形貌,如图7所示。从图7a可以看出,原始试样的纤维紧密排列,并被完全包裹于聚氨酯树脂中。在光老化1 000 h后,样品表面的聚氨酯树脂和颜料发生龟裂。甚至脱落现象(如图7c所示),将纤维暴露出来。由此可知,伪装遮障材料在老化过程中主要是树脂的分解、脱离,使纤维暴露于光照条件下,导致纤维老化损伤<sup>[15]</sup>。

### 2.3.2 化学结构

伪装遮障材料原始材料和光老化1 000 h后的红外光谱如图8所示。图8中,2 916、2 848  $\text{cm}^{-1}$ 处是甲基( $\text{C}-\text{H}$ )的伸缩振动,1 725  $\text{cm}^{-1}$ 左右是酯羰基 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动,1 448  $\text{cm}^{-1}$ 处是苯环骨架振动和 $\text{C}-\text{H}$ 变角振动,1 016  $\text{cm}^{-1}$ 处是醚基中 $\text{C}-\text{O}$ 的伸缩振动<sup>[16-20]</sup>。由图8可以看出,与原始材料相比,经过光老化1 000 h后,聚氨酯红外图谱1 725、1 448、1 016  $\text{cm}^{-1}$ 处的特征峰强度明显下降。聚氨酯的降解一般由于氨基甲酸酯基键上的断裂引起, $\text{C}-\text{O}$ 键断裂形成氨基甲酸基和烷氧基自由基,氨基甲酰自由基分解成氨基自由基和 $\text{CO}_2$ <sup>[21]</sup>,说明老化过程中伪装遮障材料表面的聚氨酯产生损耗,化学结构发生了变化。

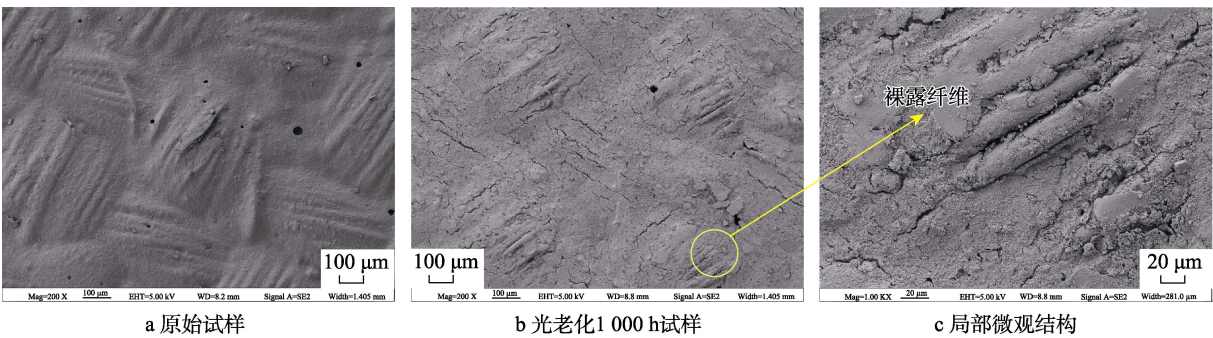


图 7 伪装遮障材料微观形貌  
Fig.7 Microstructure of camouflage materials: a) original sample; b) light aging for 1 000 h; c) local microstructure

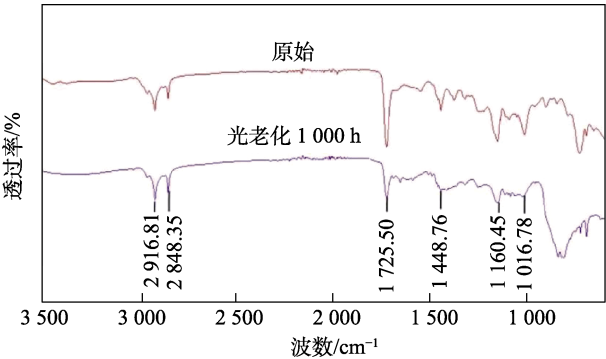


图 8 伪装遮障材料红外光谱图  
Fig.8 Infrared spectrogram of camouflage materials

2.3.3 表面元素测定

伪装遮障材料原始状态和光老化 1 000 h 时表面不同元素的 XPS 谱图如图 9 所示, 主要元素与含量见表 1。从图 9 中可以看出, 伪装遮障材料表面的元素种类在老化前后未发生变化, 主要含有 O 元素和 C 元素, 以及少量的 N、Pb、Si 元素。光老化 1 000 h 后, O 元素含量增加, 主要是因为光老化过程中加剧了伪装遮障材料表面颜料的氧化, 表层氧化物含量增加。C 元素含量略减有少, 主要是光老化过程中聚氨酯的 C—O 断裂, 进一步分解为 CO<sub>2</sub> 释放出去<sup>[21]</sup>。同时, C 元素含量减少也证明了光老化加速了聚氨酯的降解, 使得表面的聚氨酯损耗。

2.3.4 断口形貌

伪装遮障材料原始试样和光老化 1 000 h 后, 其撕破断口形貌如图 10 和图 11 所示。图 10a 和 11a 是撕破断口水平面图, 撕裂过程中, 包裹在纤维上的涂层会因纤维运动而分裂, 从图中可以看出, 原始材料表面的涂层撕裂比光老化 1 000 h 后涂层撕裂面积更广, 说明光老化后涂层的凝聚力和整体性减弱。图 10b 和 11b 是断口横截面图, 原始材料断口纤维为单体存在, 光老化 1 000 h 材料断口存在纤维团簇, 以纤维团簇直接断裂说明光老化减弱了伪装遮障材料的耐撕破强度。通过图 10c 和 11c 可以看出, 光老化过程中, 纤维损伤较小, 纤维未产生劈裂、抽丝等缺陷。图 10d 和 11d 是断口形貌图, 原始材料断口呈现

雾状区形貌, 光老化 1 000 h 后, 材料的断口呈现梳排状形貌<sup>[22-24]</sup>。从图 10 和图 11 可以看出, 断口处的纤维长短不一、错综复杂, 纤维上附着的涂层形态多样。由此推断试样撕裂破坏时, 纤维以 2 种形式失效: 一种是纤维脱黏后直接断裂; 另一种是纤维脱黏, 拔出, 或者拔出过程中断裂<sup>[23-25]</sup>。

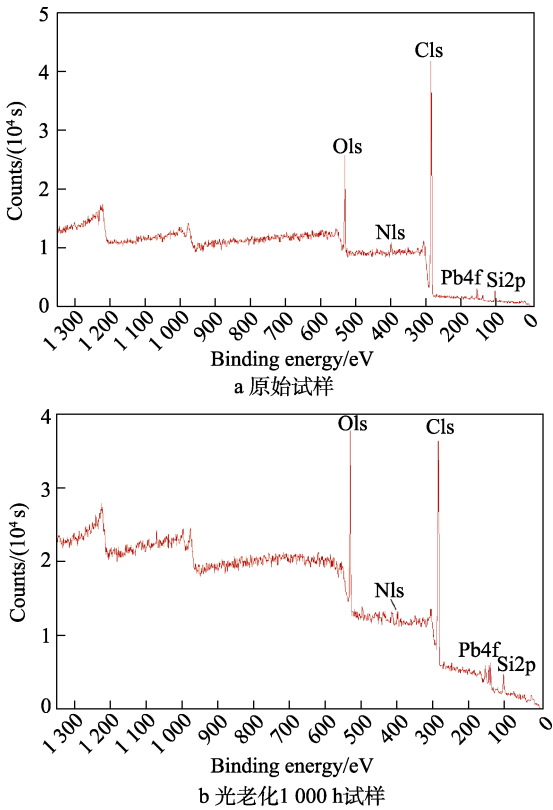


图 9 伪装遮障材料表面不同元素的 XPS 谱图  
Fig.9 XPS spectrogram of different elements on the surface of camouflage material: a) original sample; b) light aging 1 000 h sample

表 1 伪装遮障材料表面元素组成  
Tab.1 Surface element composition of camouflage material

| 试样          | C     | O     | N    | Pb   | Si   |
|-------------|-------|-------|------|------|------|
| 原始试样        | 78.85 | 14.64 | 2.82 | 0.05 | 3.65 |
| 光老化 1 000 h | 67.72 | 23.48 | 2.55 | 0.31 | 5.94 |

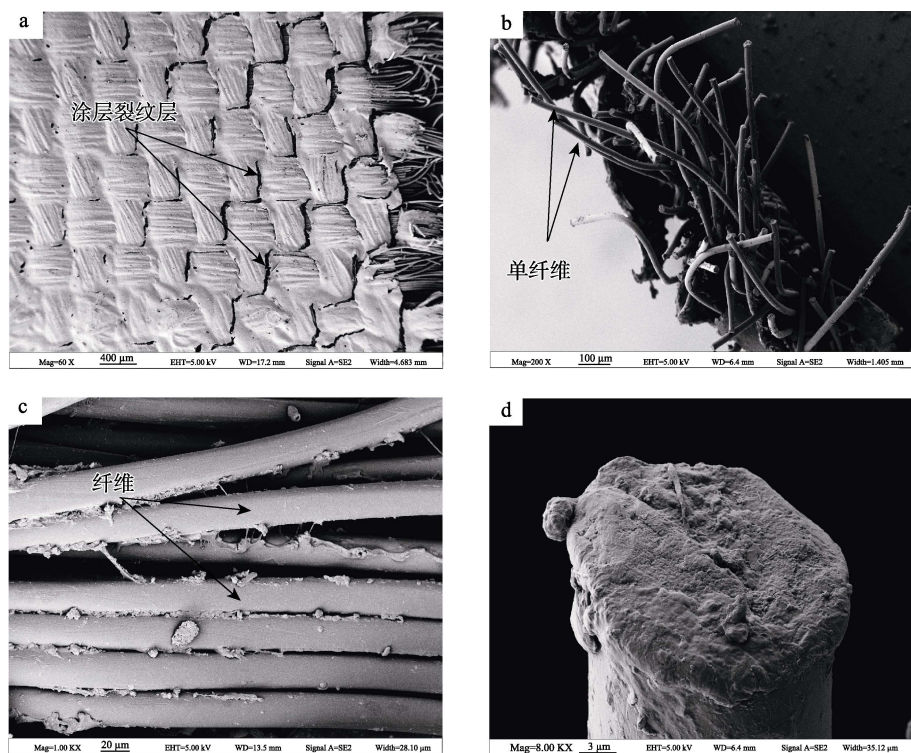


图 10 伪装遮障材料原始试样撕破断口形貌

Fig.10 Tear fracture morphology of the original sample of camouflage material

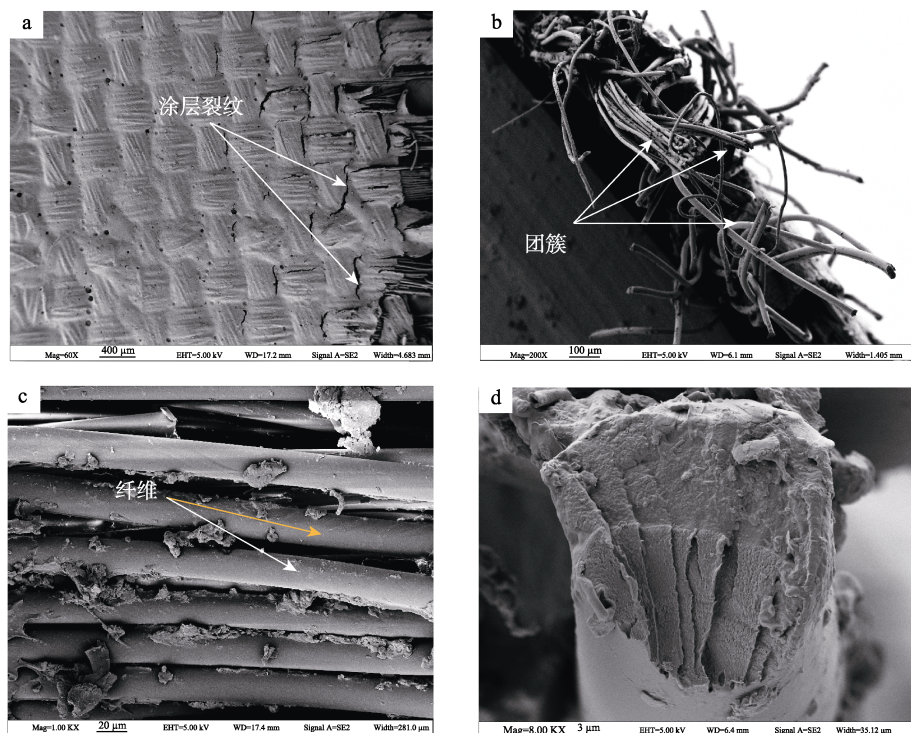


图 11 伪装遮障材料光老化 1 000 h 试样撕破断口形貌

Fig.11 Tear fracture morphology of the light aging 1 000 h sample of camouflage material

### 3 结论

本文开展了伪装遮障材料在自然环境和实验室环境中老化试验, 通过对比分析研究了其力学性能、

色差及光泽度等宏观性能的变化规律, 并利用微观形貌、红外光谱特性及 XPS 等微观特征变化进一步解释伪装遮障材料的老化机理及性能变化规律。分析发现:

1) 自然环境下, 伪装遮障材料自然老化程度大

小关系为西双版纳 > 厦门 > 济南。

2) 在实验室环境下, 光老化后伪装遮障材料的光泽度、颜色和力学性能下降程度明显高于盐雾老化和湿热老化。光照因素是加速伪装遮障材料老化的主要因素。

3) 通过微观性能分析, 伪装遮障材料在老化过程中主要是材料表面聚氨酯的分解、脱离, 纤维受损较小。伪装遮障材料破坏时, 纤维的失效形式一种是纤维脱黏、直接断裂; 另一种是纤维脱黏, 拔出, 或者拔出过程中断裂。

通过以上研究, 提升伪装遮障材料耐老化性能的手段可能包括: 原材料方面, 可考虑添加抗氧化剂、紫外吸收剂等; 在保证工艺及经济性的条件下, 适当增加表面涂层厚度, 以更好地保护底层纤维; 通过对基材表面进行机械或化学处理, 增大涂层与纤维的结合度, 降低老化过程中涂层的脱落率。

#### 参考文献:

- [1] 李进, 胡碧茹. 伪装技术装备现状及其发展趋势[C]//中国航空学会火箭发动机委员会, 中国机械工程学会复合材料委员会, 中国复合材料学会教育与科普委员会 2001 年学术研讨会论文集. 长沙: 中国航空学会, 2001.  
LI J, HU B R. The Status Quo and Development of Camouflage Equipment[C]// The Rocket Engine Committee of the Chinese Society of Aeronautics, the Composite Materials Committee of the Chinese Society of Mechanical Engineering, and the Education and Popular Science Committee of the Chinese Society of Composite Materials in 2001 Academic Seminar. Changsha: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [2] 夏成龙, 陈永宁, 屈阳华. 伪装涂层附着力影响因素研究[J]. 新技术新工艺, 2011(11): 66-67.  
XIA C L, CHEN Y N, QU Y H. Influence of Adhesion Strength of Camouflage Coating[J]. New Technology & New Process, 2011(11): 66-67.
- [3] 冯海潮, 张健, 赵志勇, 等. 伪装遮障及其技术发展综述[J]. 科技与创新, 2022(23): 159-161.  
FENG H C, ZHANG J, ZHAO Z Y, et al. A Summary of Camouflage Obstacle and Its Technical Development[J]. Science and Technology & Innovation, 2022(23): 159-161.
- [4] 颜云辉, 王展, 董德威. 军事伪装技术的发展现状与趋势[J]. 中国机械工程, 2012, 23(17): 2136-2141.  
YAN Y H, WANG Z, DONG D W. Current Actuality and Development Tendency of Military Camouflage Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(17): 2136-2141.
- [5] 周胜蓝, 高成勇, 王纳新, 等. 可见光兼容红外伪装涂层的试验[C]// 中国汽车工程学会越野车技术分会 2012 学术年会. 武汉: 中国汽车工程学会, 2012.  
ZHOU S L, GAO C Y, WANG N X, et al. Tests of Visible Light Compatible Infrared Camouflage Coatings[C]// China Society of Automotive Engineering Off-Road Vehicle Technology Branch 2012 Academic Annual Meeting. Wuhan: China SAE, 2012.
- [6] FOSS C F. UK Armoured Vehicles Get Thermal Imaging[J]. Jane's Defence Weekly, 2005, 42(1): 11.
- [7] 刘凯龙. 国外伪装器材及性能测试的新进展[J]. 装备环境工程, 2006, 3(5): 92-95.  
LIU K L. New Progress of Camouflage Equipment and Performance Test Abroad[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(5): 92-95.
- [8] 李源, 杨建军, 韩晓明. 防空武器系统伪装技术及其发展趋势[J]. 国防技术基础, 2008(2): 48-50.  
LI Y, YANG J J, HAN X M. Camouflage Technology of Air Defense Weapon System and Its Development Trend[J]. Technology Foundation of National Defence, 2008(2): 48-50.
- [9] 孙岩, 王登霞, 刘亚平, 等. 玻璃纤维/溴化环氧树脂加速老化与自然老化的相关性[J]. 复合材料学报, 2014, 31(4): 916-924.  
SUN Y, WANG D X, LIU Y P, et al. Correlation of Accelerated Aging and Natural Aging of Glass Fiber Reinforced Bromide Epoxy Vinyl Ester Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(4): 916-924.
- [10] 谢可勇, 李晖, 孙岩, 等. 湿热老化对纤维增强树脂基复合材料性能的影响及其机理[J]. 机械工程材料, 2014, 38(8): 1-5.  
XIE K Y, LI H, SUN Y, et al. Effect of Hygrothermal Aging on Behaviors of Fiber Reinforced Resin Composites and Its Mechanism[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(8): 1-5.
- [11] 安琪, 王登霞, 孙岩, 等. 玻纤增强复合材料在厦门地区自然老化及寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 141-146.  
AN Q, WANG D X, SUN Y, et al. Natural Aging and Life Prediction of Glass Fiber Reinforced Composite Material in Xiamen[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 141-146.
- [12] 刘海韬, 程海峰, 曹义, 等. 具有反雷达性能的伪装饰片基础布的制备及性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2006, 29(4): 8-12.  
LIU H T, CHENG H F, CAO Y, et al. Preparations and Properties of Basic Cloths of the Scattering Anti-Radar Camouflage Net[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2006, 29(4): 8-12.
- [13] 王承舫. 反雷达伪装网各类基础布微波特性的分析[J]. 工兵装备研究, 1998(4): 41-46.  
WANG C F. Analysis of Microwave Characteristics of Various Base Cloth of Anti-Radar Camouflage Net[J]. Engineer Equipment Research, 1998(4): 41-46.
- [14] 王登霞, 孙岩, 谢可勇, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料模拟海洋环境长期老化及失效行为[J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1353-1362.

- WANG D X, SUN Y, XIE K Y, et al. Long Term Aging and Failure Behaviors of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites in Simulated Marine Environments[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(3): 1353-1362.
- [15] 卢言利. 有机涂层高原环境影响参数分析及老化机理研究[J]. *涂料工业*, 2012, 42(4): 12-16.
- LU Y L. Ageing Mechanisms and Influencing Factors for Organic Coatings Used in Plateau Environment[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2012, 42(4): 12-16.
- [16] WILLIAMS P, NORRIS K. Near Infrared Technology in Agricultural and Food Industries[M]. United States of America: American Association of Cereal Chemists, 2001:185-210.
- [17] 郝立才, 肖红, 刘卫. 织物热红外伪装性能测试评价技术现状[J]. *红外技术*, 2013, 35(8): 512-517.
- HAO L C, XIAO H, LIU W. Review on Evaluating Methods of Thermal Infrared Camouflage Performance of Textiles[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(8): 512-517.
- [18] 张功. 短中波红外探测系统光学薄膜关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- ZHANG G. Research on Key Technologies of Optical Thin Film in Short and Medium Wave Infrared Detection System[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [19] 汤定元. 我国红外技术发展的回顾[J]. *激光与红外*, 1998, 28(5): 260-266.
- TANG D Y. Review of the Development of Infrared Technology in China[J]. *Laser & Infrared*, 1998, 28(5): 260-266.
- [20] INDUSHEKAR R, SRIVASTAVA A, SEN A K. The Art of Camouflage and Role of Textiles Incamouflage[J]. *Manmade Textiles in India*, 1996, 39(12): 449-453.
- [21] 刘凉冰. 聚氨酯的化学降解及其性能[J]. *聚氨酯工业*, 2001, 16(2): 5-8.
- LIU L B. The Chemical Degradation and the Related Property of Polyurethanes[J]. *Polyurethane Industry*, 2001, 16(2): 5-8.
- [22] BILBAO R, MASTRAL J F, CEAMANOS J, et al. Kinetics of the Thermal Decomposition of Polyurethane Foams in Nitrogen and Air Atmospheres[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1996, 37(1): 69-82.
- [23] 侯学勤, 范金娟, 何玉怀. 纤维增强树脂基复合材料断口分析[J]. *四川兵工学报*, 2010, 31(11): 123-126.
- HOU X Q, FAN J J, HE Y H. Fracture Analysis of Fiber Reinforced Resin Matrix Composites[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2010, 31(11): 123-126.
- [24] 王琛琛, 王振彪, 常军, 等. VARI 工艺制备碳纤维/环氧树脂复合材料的耐腐蚀性能及断口形貌分析[J]. *辽宁化工*, 2023, 52(6): 808-811.
- WANG C C, WANG Z B, CHANG J, et al. Corrosion Resistance and Fracture Morphology Analysis of Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites Prepared by VARI Process[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2023, 52(6): 808-811.
- [25] 吕凯, 刘向东, 李艳芬, 等. 纤维增强熔模铸造复合型的性能及断口形貌[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(10): 1361-1365.
- LYU K, LIU X D, LI Y F, et al. Properties and Fracture Surface Morphology of Fiber-Reinforced Shell for Investment Casting[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(10): 1361-1365.