

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.01.025

何睿, 张峰, 张袁泉, 等. 常用小麦粉包装材料的性能及其防虫效果研究[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(1): 231-237.

HE R, ZHANG F, ZHANG Y Q, et al. Study on the properties and pest control effects of five common wheat flour packaging materials[J].

Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(1): 231-237.

常用小麦粉包装材料的性能 及其防虫效果研究

何睿¹, 张峰¹, 张袁泉², 陈金身², 吕建华²✉

(1. 中山市粮食储备经营管理有限公司, 广东 中山 528447;

2. 河南工业大学 粮食和物资储备学院 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了解常用小麦粉包装材料的物理性能及其防虫效果, 测试了5种包装材料的拉伸性能、直角撕裂强度、抗穿刺能力、燃烧性能、摩擦系数、抗跌落性能、耐压性能和密封性能, 并使用赤拟谷盗成虫、烟草甲成虫以及烟草甲初孵幼虫对其防虫效果进行了测试。结果表明: 在力学性能上, 编织袋和铝箔袋表现出了较佳的抗拉伸、抗撕裂能力和抗穿刺能力, 当作为包装袋使用时, 无纺布和编织袋表现出较佳的耐摩擦、抗跌落、耐压性能。5种常用包装材料都具有保护小麦粉不受储粮害虫侵害的能力, 特别是真空塑料袋和铝箔袋可完全保护小麦粉不受储粮害虫侵害。

关键词: 包装材料; 储粮害虫; 防虫; 性能测定**中图分类号:** S379.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2025)01-0231-07**网络首发时间:** 2024-12-26 17:06:50**网络首发地址:** <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20241225.1844.023>

Study on the Properties and Pest Control Effects of Five Common Wheat Flour Packaging Materials

HE Rui¹, ZHANG Feng¹, ZHANG Yuan-quan², CHEN Jin-shen², LV Jian-hua²✉

(1. Zhongshan Grain Reserve Management Co., LTD., Zhongshan, Guangdong 528447, China;

2. Henan Collaborative Innovation Center for Grain Storage Security, School of Food and

Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: This study investigated the physical properties and pest resistance of five common packaging materials. Tests were conducted on tensile properties, right-angle tearing strength, puncture resistance, combustion performance, friction coefficient, drop resistance, pressure resistance, and sealing performance. Pest resistance was evaluated using adult *Tribolium castaneum* (Herbst), adult *Lasioderma serricorne* (Fabricius), and newly hatched larvae of *L. serricorne*. The results showed that, in terms of mechanical properties, woven bags and aluminum foil bags exhibited superior tensile, tear, and puncture resistance.

收稿日期: 2024-05-10; **收稿日期:** 2024-06-05; **录用日期:** 2024-06-06**基金项目:** 中山市粮食储备经营管理有限公司科技项目 (LCCC-2022-070); “十四五”国家重点研发计划项目 (2021YFD2100604)**Supported by:** Science and Technology Project of Zhongshan Grain Reserve Operation Management Co., LTD. (No. LCCC-2022-070); National Key Research and Development Project of the 14th Five-Year Plan, China (No. 2021YFD2100604)**第一作者:** 何睿, 男, 1985年出生, 学士, 研究方向为粮食安全储藏, E-mail: herui77@126.com**通信作者:** 吕建华, 男, 1971年出生, 博士, 教授, 研究方向为储粮害虫综合治理及储粮品质控制, E-mail: jianhly@163.com

However, when used as packaging bags, non-woven fabrics and woven bags demonstrated better performance in friction, drop, and pressure resistance. All five packaging materials effectively protected wheat flour from stored grain pests, with vacuum plastic bags and aluminum foil bags providing complete protection.

Key words: packaging material; stored grain insects; pest resistance; performance measurement

小麦粉是世界上多数人食用以及作为食品的主要原料。小麦粉含有多种营养物质,在适宜温湿度条件下可受多种储粮害虫为害^[1]。良好的包装材料是保护小麦粉在贮藏期间不受虫害的重要防御手段^[2]。

大多数储粮害虫可通过储藏物散发的气味找到他们^[3],例如小麦胚芽挥发物对赤拟谷盗有显著吸引作用^[4]。储粮害虫会穿过包装上现有的孔隙或在包装材料上钻孔进入储藏物^[4-5]。雌性锯谷盗成虫也可区分含有食物和非食物的密闭包装,且更倾向于在有洞的区域周围停留^[3]。烟草甲幼虫对不同包装材料的钻透率差异显著,带孔洞的包装更易受到烟草甲幼虫侵害^[6]。同时,不同包装材料对昆虫穿透的抵抗力不同^[7]。所以选择合适的包装材料是防止害虫感染的有效方式。

筛选防虫包装材料、研发抗虫包装是近年来食品工业研究热点。一般来说,小麦粉在国内常用的包装材料有真空塑料袋、无纺布袋、牛皮纸袋、铝箔袋、塑料复合袋等。然而,对不同包装材料的防虫效果了解甚少。作为储粮环境中的主要害虫,赤拟谷盗和烟草甲均可侵染小麦粉。因此,本文研究了5种包装材料的8种基础性能,并评价了其对赤拟谷盗和烟草甲的防虫能力,以期筛选防虫包装或改进包装材料的防虫效果提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 虫源及饲养

试验所用试虫赤拟谷盗(*Tribolium castaneum*)和烟草甲(*Lasioderma serricorne*)均在河南工业大学储粮害虫防治实验室人工纯化饲养3代以上。昆虫在27~29℃、60%~70%RH,全暗环境下饲养,以全麦粉(过80目筛)与酵母按19:1(重量比)混合后作为饲料。

为保证试验样本一致性,使用同一龄期的试虫。将过100目筛的全麦粉放入养虫瓶中,分别接入以上试虫成虫1000头左右,1d后用40目筛将成虫筛出,将含卵饲料置于培养箱继续培养,培养1~2d后用80目筛除去全麦粉,得到烟草甲初孵幼虫。取1~2日龄烟草甲初孵幼虫和3~5日龄烟草甲成虫、1~2周龄赤拟谷盗成虫进行害虫侵染试验。

1.2 主要材料

全麦粉,含水量为13.5%;精制小麦粉,含水量为12.7%;真空塑料袋(聚乙烯),60μm厚;牛皮纸,80g/m²;无纺布袋,70g/m²;铝箔袋,0.1mm厚;编织塑料袋(聚乙烯),0.12mm厚。

将各种包装材料制成8cm×15cm的小袋,每袋装有50g全麦粉或精制小麦粉,并仔细密封以进行侵染试验。牛皮纸袋用胶水密封1cm度,无纺布袋、真空塑料袋、编织塑料袋采用热封机密封2mm宽,铝箔袋采用边缘向内卷边三次后轧制的方式密封。在测试前,在40倍放大的立体显微镜下仔细检查包装袋是否有孔洞存在。

1.3 主要仪器设备

SPX-250BX型生化培养箱、101-E型电热恒温鼓风干燥箱:北京市永光明医疗仪器有限公司;SZN型连续变倍体视显微镜:舜宇光学科技有限公司;LYWSD03MMC型温湿度计:北京小米科技有限责任公司;FS150型热封机:永康市特力包装机械有限公司;PD-151型游标卡尺:广东慧智电子科技有限公司;WDW-50H型万能试验机:济南川佰仪器设备有限公司;LX-C-2指针式邵氏硬度计:温州韦度电子有限公司;HVUL-2型水平垂直燃烧试验仪:深圳市德迈盛测控设备有限公司;MM-W1B型万能摩擦试验机:济南时代试金试验机有限公司。

1.4 试验方法

1.4.1 拉伸性能测定

参照国标 GB/T 1040.1—2018《塑料 拉伸性能的测定 第1部分：总则》进行。

1.4.2 直角撕裂强度测试

按照模具形状与尺寸制备试样，并在标准环境下处理所有试样至平衡，处理时间不少于4 h。选取合格的标准试样，测量试样厚度和宽度后将试样夹持于上、下夹具之间，以合适的速度对试样进行拉伸，直至试样拉断，裂口应在直角口处。记录试样断裂时的最大拉伸载荷，计算直角撕裂强度。

1.4.3 抗刺穿能力测试

本文选用邵氏硬度体系表示抗刺穿能力。将试样放在坚固的平面上，手持硬度计，压针距离试样边缘至少10 mm，平稳将压足压在试样上，保持压足平行于试样表面，以使压针垂直压入试样。所施力要刚好使压足和试样紧密接触，在压足和试样紧密接触并受到试验负荷后3 s内读数。每个测量点只测1次，同一试样间隔10 mm以上的不同部位测量点不少于3点，取其平均值。

1.4.4 燃烧性能测试

采用水平垂直燃烧试验仪测试材料的燃烧性能。试样尺寸为 (130 ± 5) mm \times (13 ± 0.3) mm。本试验第一、二标线位置分别为25和100 mm，标线之间距离差为75 mm。水平燃烧试验时，夹住燃烧试样一端水平放置，取一铁网水平固定在试样下方，将本生灯移至试片另一端接触样品，点燃试样后移开，待试片烧至25 mm标记时，启动计时器，根据燃烧时间和燃烧距离测试材料的燃烧速度。垂直燃烧试验时，把燃烧试样垂直放置，点燃后测试材料的总有焰燃烧时间和无焰燃烧时间，以及观察聚合物的燃烧情况。两种试验方法中本生灯高度均为25 cm。

1.4.5 摩擦系数测试

将试样剪裁至合适大小用胶水粘贴在仪器对磨件（外径50 mm，内径40 mm，高度5 mm）上，摩擦的接触面积为 $1\,963.5$ mm²。试验条件为载荷100 N、加载速度5、上部球体旋转速度10 r/min、测试时间100 s后开始试验，记录材料的摩擦系数。

1.4.6 跌落试验

用小麦填装试验样品2.5 kg，填装产品的质量与预装产品的公称质量之差应在 $\pm 0.2\%$ 以内，以预定方式封合试验样品。将试验样品提升至预定跌落高度。分别用试验样品的正面、侧面与底面连续进行跌落，当内装物发生泄漏溢出时，则认为试验样品破裂，停止试验。跌落造成的细微缺陷，如封口处与缝合处的孔洞，只要试验后提起袋时不发生泄漏，则视为通过试验。记录不同跌落方式破裂时的最终跌落高度。

1.4.7 耐压强度试验

首先向试样袋中装入实际的内装物或类似的内装物，按包装袋的热封工艺进行热封。然后将试样袋放置在加压盘的中央位置，加压盘靠近试样袋表面部分应光滑平整，以免把试样袋划破。上加压盘的上部放置荷重，对试样袋施加压缩载荷，放置荷重后，加压盘不能变形，要始终保持平衡。上加压盘向试样袋均匀缓慢加载，当内装物漏出或试样袋破裂时停止加载。记录此时的最大压缩强度。

1.4.8 密封性能测试

首先向试样袋中装入实际的内装物或类似的内装物，按包装袋的热封工艺进行热封。然后将试样袋浸入 (60 ± 2) °C的热水中，试样袋表面最高处距水面的深度距离至少应保持25 mm，并轻轻地迅速抹去其表面的气泡，再将试样袋在水面下翻转。用手轻微挤压包装袋，观察气泡开始产生时间。

1.4.9 害虫感染试验

在包装和未包装（对照）条件下，测试储粮害虫对小麦粉的侵染效果。对于包装小麦粉，将装有50 g全麦粉或精制小麦粉的密封袋装入玻璃瓶，然后向玻璃瓶中放入20头成虫或30头烟草甲初孵幼虫，成虫和幼虫都在包装小麦粉外。对于未包装的小麦粉，将每种小麦粉50 g放在一个玻璃瓶中，并将20头成虫或30头烟草甲初孵幼虫放入玻璃瓶中。所有样品玻璃瓶瓶口都用棉布覆盖，用橡皮筋固定，在27~29 °C、60%~70% RH、12:12 (L:D)光周期环境中保存45 d。重复5次。45 d后，记录小麦粉中活幼虫和成虫数量。

对于包装小麦粉，将包装材料在立体显微镜下检查包装材料是否存在损伤或缺陷。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行初步统计处理。采用 SPSS 16.0 软件进行方差分析。采用 Duncans 多重比较法检验其差异显著性。

包装材料防御能力 (DC) 值计算公式如下：

$$DC(\%) = \left(1 - \frac{A}{B}\right) \times 100\%$$

其中，A 为包装小麦粉中昆虫种群数量，B 为未包装小麦粉中昆虫种群数量。

2 结果与分析

2.1 5 种常用包装材料的拉伸性能

5 种材料间的拉伸强度差异显著 (表 1) ($F=100.40$, $df=4$, $P<0.05$, 其中 F 值为两个均方的比值, df 值为自由度, P 值为显著性, 下同), 其中编织袋拉伸强度最大, 抗拉伸能力最大, 材料弹性最大; 铝箔的弹性模量显著高于其他 4 种材料 ($F=34.22$, $df=4$, $P<0.05$), 其产生弹性形变难度最大; 无纺布袋的断裂伸长率显著高于其他 4 种材料 ($F=256.77$, $df=4$, $P<0.05$), 表明其具有很好的可塑性, 不易断裂。

表 1 5 种粮食常用包装材料的拉伸性能
Table 1 Tensile properties of five commonly used grain packaging materials

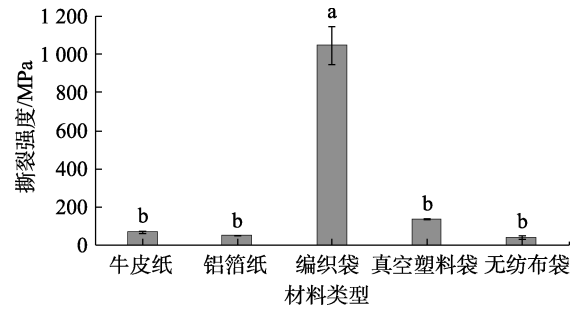
材料类别	拉伸强度/MPa	弹性模量/MPa	断裂伸长率/%
牛皮纸	22.61±0.29c	977.24±34.04b	7.19±0.50d
铝箔	63.98±5.36b	2 776.73±435.61a	10.67±2.59d
编织袋	85.11±5.19a	208.58±34.88c	57.01±6.49c
真空塑料袋	18.39±0.71c	180.91±13.28c	167.37±11.67b
无纺布袋	6.18±0.19d	26.58±0.89c	332.5±13.58a

注：表中数据为平均值±标准差；同一列数据后带有不同小写字母者表示数据间差异达到显著水平 ($P<0.05$), 下同。

Note: The data in the table are mean values and standard deviations; Data followed by different lowercase letters in each column indicate significant difference according to Duncans test at $P<0.05$. The same as below.

2.2 5 种常用包装材料的直角撕裂强度

编织袋的直角撕裂强度显著高于其他材料 ($F=93.75$, $df=4$, $P<0.05$), 最大可达到 1 049.42 MPa, 无纺布袋的撕裂强度最低, 为 40.00 MPa (图 1), 这表明编织袋的抗撕裂能力最强。



注：不同的小写字母表示数据间差异达到显著水平 ($P<0.05$), 下同。

Note: Data followed by different lowercase letters indicate significant differences according to Duncans test at $P<0.05$. The same as below.

图 1 5 种粮食常用包装材料的撕裂强度
Fig.1 Tearing strength of five commonly used grain packaging materials

2.3 5 种常用包装材料的抗刺穿能力

铝箔袋的邵氏硬度显著高于其他材料 ($F=706.90$, $df=4$, $P<0.05$), 说明在这 5 种材料中铝箔抗刺穿能力或受压变形程度最强, 而编织袋的邵氏硬度在几种材料最低, 最易被刺穿 (图 2)。

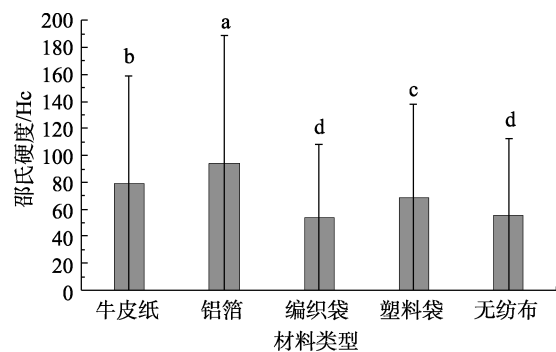


图 2 5 种粮食常用包装材料的邵氏硬度
Fig.2 Shore hardness of five commonly used grain packaging materials

2.4 5 种常用包装材料的燃烧性能

在水平燃烧试验中, 仅编织袋达到 UL94-HB 阻燃等级, 其余材料均未达到 UL94 阻燃等级 (表 2)。其中无纺布燃烧速率最快, 会发生熔滴现象; 而牛皮纸和真空塑料袋不会发生熔滴现象。在垂直燃烧试验中, 牛皮纸燃烧速率最快, 铝箔燃烧速率最慢, 其中真空塑料袋和编织袋经垂直火焰加热后热缩成一团, 无法计算燃烧速率。

2.5 5 种常用包装材料的摩擦系数

无纺布的平均摩擦系数显著高于其他材料 ($F=166.92$, $df=4$, $P<0.05$), 最高可达 0.45, 编

表2 5种粮食常用包装材料的燃烧性能
 Table 2 Combustion performance of five commonly used grain packaging materials mm/min

材料类别	水平燃烧试验		垂直燃烧试验	
	燃烧速率	燃烧状态	燃烧速率	燃烧状态
无纺布	354.24±41.00	熔滴	411.56±53.78	熔滴
牛皮纸	279.16±27.83	不发生熔滴	443.21±120.32	不发生熔滴
真空塑料袋	143.74±17.02	不发生熔滴	—	热缩合成一团
编织袋	0.7 s	未燃至第一标线, 不发生熔滴	—	热缩合成一团
铝箔	196.71±22.88	熔滴	196.71±22.88	熔滴

织袋次之, 为 0.32, 牛皮纸的摩擦系数最低, 为 0.12 (图 3)。

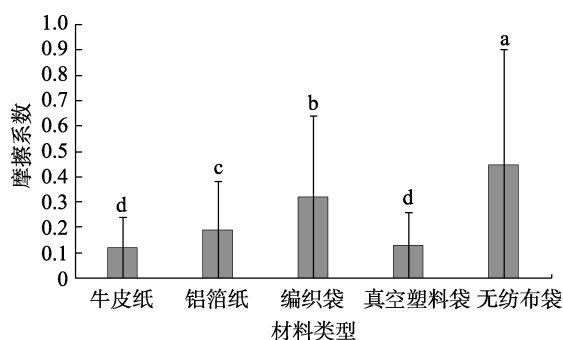


图3 5种包装材料间的平均摩擦系数
 Fig.3 Average friction coefficient among five packaging materials

2.6 跌落试验

无纺布所表现的抗跌落性能显著高于其他材料 ($F=965.00$, $df=4$, $P<0.05$), 正面跌落时可保持 3 m 的跌落高度而不破裂, 侧面和底面跌落时也可保持在 1.1 m 和 0.87 m 的跌落高度而不破裂, 而 5 种材料中牛皮纸的抗跌落性能最低 (表 3)。

表3 不同跌落方式下 5 种包装材料破裂时的最终跌落高度
 Table 3 Final drop height of five packaging materials when broken under different drop modes m

材料类别	正面	侧面	底面
牛皮纸袋	0.73±0.03d	0.47±0.03d	0.63±0.03d
铝箔袋	0.33±0.03e	0.37±0.03d	0.27±0.03e
编织袋	1.93±0.03b	1.37±0.03b	1.57±0.03b
真空塑料袋	1.53±0.03c	1.10±0.06c	0.87±0.07c
无纺布袋	2.97±0.03a	2.33±0.03a	2.43±0.03a

2.7 5种常用包装材料的耐压强度

无纺布袋的耐压强度显著高于其他材料 ($F=70.21$, $df=4$, $P<0.05$), 压缩强度最大可以达到 6.32 MPa, 牛皮纸、铝箔和编织袋之间的耐压强度无显著差异 (图 4)。

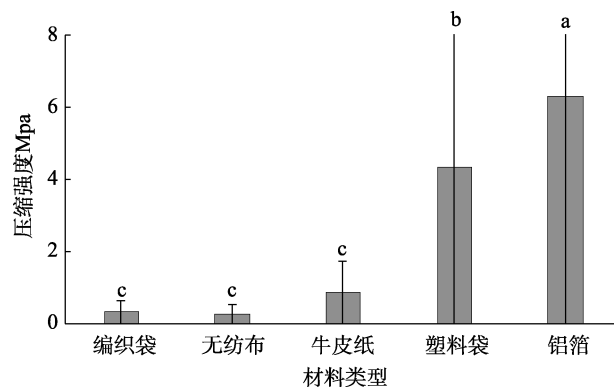


图4 5种包装材料间的压缩强度

Fig.4 Compressive strength among five packaging materials

2.8 5种常用包装材料的密封性能

铝箔袋和真空塑料袋在处理时间内一直没有气泡产生, 证明二者的密封性最佳, 而编织袋在 15 s 内有气泡产生, 证明其密封性较差 (表 4)。

表4 粮食常用包装材料在不同时间内的密封状态

Table 4 Sealing status of commonly used food packaging materials over different periods

	15 s	30 s	45 s	60 s
无纺布	无气泡	无气泡	有气泡	有气泡
编织袋	有气泡	有气泡	有气泡	有气泡
塑料袋	无气泡	无气泡	无气泡	无气泡
铝箔	无气泡	无气泡	无气泡	无气泡
牛皮纸	无气泡	有气泡	有气泡	有气泡

2.9 不同包装材料的防虫效果

在未包装条件下, 赤拟谷盗成虫、烟草甲成虫、烟草甲初孵幼虫均可侵染全麦粉和精制小麦粉 (表 5)。所有的包装材料都能明显地保护小麦粉不受赤拟谷盗成虫的侵染。同一材料对全麦粉和精制小麦粉的防御效果相似, 但不同材料间的防御能力差异很大 (表 5)。

小麦粉种类对烟草甲成虫数量无显著影响, 包装材料对烟草甲成虫数量有显著影响 ($F=43.84$, $df=5$, $P<0.01$), 其交互作用对包装小麦粉中烟草甲成虫数量有显著影响 ($F=13.55$, $df=5$,

$P < 0.01$)。所有包装材料都能保护小麦粉不受烟草甲成虫和烟草甲初孵幼虫的侵害, 但不同材料间的防御能力差异很大(表 5)。除无纺布袋外, 其他几种材料对小麦粉的防御效果相似。

表 5 全麦粉和小麦粉在不同包装材料内贮藏 45 d 后的昆虫种群数量

Table 5 Insect populations in whole wheat flour and refined wheat flour after 45 days of storage in different packaging materials

包装材料	面粉类型	赤拟谷盗	烟草甲成虫	烟草甲初孵幼虫
空白对照	全麦粉	931.00±104.50a	333.30±51.70a	28.30±0.70a
	小麦粉	740.00±17.10b	209.70±22.70ab	27.70±0.90a
塑料编织袋	全麦粉	26.30±3.00c	136.30±35.90b	12.30±1.40b
	小麦粉	46.00±19.90c	171.00±59.70b	14.00±0.40b
无纺布袋	全麦粉	1.00±0.60c	63.00±20.60c	20.00±1.50ab
	小麦粉	3.30±0.90c	341.30±24.00a	18.00±0.40ab
牛皮纸袋	全麦粉	0.70±0.70c	0.00±0.00d	0.70±0.20cd
	小麦粉	0.30±0.30c	0.30±0.30d	1.30±0.90c
真空塑料袋	全麦粉	0.00±0.00c	0.00±0.00d	0.00±0.00d
	小麦粉	0.00±0.00c	0.00±0.00d	0.00±0.00d
铝箔袋	全麦粉	0.00±0.00c	0.00±0.00d	0.00±0.00d
	小麦粉	0.00±0.00c	0.00±0.00d	0.00±0.00d

5 种包装材料对赤拟谷盗的防御能力为: 真空塑料袋=铝箔袋>牛皮纸袋>无纺布袋>塑料编织袋(图 5)。所有塑料编织袋和无纺布袋的边缘或上表面均有少量明显的划痕和孔洞(直径 < 1 mm), 牛皮纸袋上表面也有轻微破损。真空塑料袋、铝箔袋表面未发现破损。

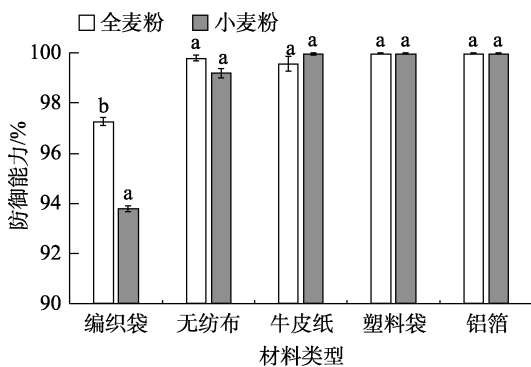


图 5 5 种包装材料对赤拟谷盗成虫侵染的防御能力 (DC) 值
Fig.5 Defense capability (DC) values of five packaging materials against the infestation of adult *Tribolium castaneum* (Herbst)

在烟草甲成虫侵染下, 所测包装材料对小麦粉有明显的防护效果(图 6)。包装材料的防护效

果为铝箔袋=真空塑料袋=牛皮纸袋>无纺布袋>编织塑料袋。在所有的无纺布袋和编织袋的褶皱处或边缘处都能清晰地观察到几个入口孔(最大的孔直径约为 3 mm), 牛皮纸袋表面有轻微破损, 铝箔袋和真空塑料袋均未发现破损。

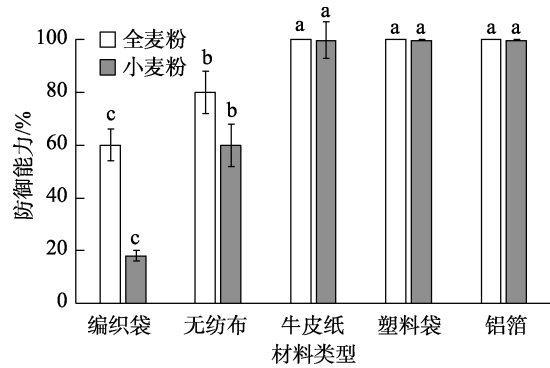


图 6 5 种包装材料对烟草甲成虫侵染的防御能力 (DC) 值
Fig.6 Defense capability (DC) values of five packaging materials against the infestation of adult *Lasioderma serricorne* (Fabricius)

3 讨论与结论

本研究结果表明: 编织袋和铝箔袋具有较佳的抗拉伸、抗撕裂和抗刺穿能力, 无纺布和编织袋表现出较好的摩擦、跌落、耐压性能。所试包装材料都能保护小麦粉不受储粮害虫侵染, 但不同材料的防虫效果差异很大, 真空塑料袋和铝箔袋可完全保护小麦粉不受储粮害虫侵害。

通常情况下, 昆虫的产卵和摄食行为显著受储藏物特征挥发物的影响^[3]。印度谷螟 (*Plodia interpunctella*) 可区分有食物的密封包装袋和没有食物的包装袋进行产卵^[8], 锯谷盗 (*Oryzaephilus surinamensis*) 雌性成虫会被包装好的物品吸引并产卵^[9], 玉米象能选择性地对不同意大利面散发出的气味做出不同反应^[10]。增强包装材料对食品香气挥发物的高屏障性能可一定程度上减少包装物对昆虫的吸引^[11]。密封性能越好, 包装物对害虫的吸引力越小, 防虫效果也就越好。

包装上出现针孔一般是由于装卸时的冲撞摩擦及器械工具或干硬食品的突出部分与薄膜碰击等原因导致的^[12]。在 Cline^[7]测试的 7 种材料中, 赤拟谷盗幼虫或成虫都无法穿透任何一种测试材料。本试验中, 无纺布袋和编织袋褶皱处或边缘

处都能清晰地观察到虫孔，牛皮纸袋表面有轻微破损，铝箔袋和真空塑料袋均未完好，这与各材料所测抗刺穿能力相似，也与早期报道的防虫结果相似。

改变包装材料的拉伸性能、硬度和韧性等物理特性可改变其他较硬物体压入其表面的能力进而增加材料的适用性。Chung 等^[13]指出具有最高伸长率和最低拉伸强度值的线性低密度聚乙烯（LLDPE）薄膜最能保护食物免受赤拟谷盗和印度谷螟侵害，这与本文所测拉伸强度最低但断裂伸长率最高的无纺布所表现出的防虫效果有较大差异。

本研究明确了 5 种常用小麦粉包装材料的一些物理性能，并评价了其防虫能力，发现材料的密封性、抗刺穿能力、薄膜厚度和机械性能与防虫效果有一定关系，为筛选防虫包装或改进包装材料的防虫效果提供参考依据。但在试验中将各材料制成小袋进行测试，与实际应用有一定差距，导致试验结果与实际效果可能存在一定差异。目前为增强防虫效果，已有研究将化学药剂与包装材料结合研制抗虫包装用于驱避害虫，但在筛选合适的化学药剂并有效与常用包装材料联合使用方面还有待进一步深入研究。

参考文献：

- [1] HUBERT J, NESVORNA M, STEJSKAL V. The efficacy of sieving, filth flotation and Tullgren heat extraction for detecting various developmental stages of *Tribolium castaneum* and *Ephestia kuehniella* in samples of wheat grain, flour and semolina[J]. Journal of Stored Products Research, 2009, 45(4): 279-288.
- [2] LICCIARDELLO F. Development of insect-repellent food packaging materials[M]. Reference Module in Food Science. Elsevier, 2018: 1-18.
- [3] MOWERY S V, CAMPBELL J F, MULLEN M A, et al. Response of *Oryzaephilus surinamensis* (Coleoptera: Silvanidae) to food odor emanating through consumer packaging films[J]. Environmental Entomology, 2013(1): 75-80.
- [4] PHILLIPS T W, JIANG X L, BURKHOLDER W E, et al. Behavioral responses to food volatiles by two species of stored-product coleoptera, *Sitophilus oryzae* (curculionidae) and *Tribolium castaneum* (tenebrionidae)[J]. Journal of Chemical Ecology, 1993, 19(4): 723-734.
- [5] HIGHLAND H A. Insect resistance of food packages: a review[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 1978, 2(2): 123-129.
- [6] 郭亚飞, 吕建华, 郭建华, 等. 烟草甲初孵幼虫耐饥饿能力及其对包装材料的钻透率[J]. 烟草科技, 2021, 54(7): 29-34.
GUO T Y, LV J H, GUO J H, et al. Starvation tolerance of newly hatched *Lasioderma serricorne* larvae and their penetration rates through different packaging materials[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(7): 29-34.
- [7] DANIEL C L. Penetration of seven common flexible packaging materials by larvae and adults of eleven species of stored-product insects[J]. Journal of Economic Entomology, 1978, 71(5): 726-729.
- [8] AULICKY R, VENDL T, STEJSKAL V. Evaluation of contamination of packages containing cereal-fruit bars by eggs of the pest Indian meal moth (*Plodia interpunctella*, Lepidoptera) due to perforations in their polypropylene foil packaging[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(7): 3293-3299.
- [9] MOWERY S V, MULLEN M A, CAMPBELL J F, et al. Mechanisms underlying sawtoothed grain beetle[J]. Journal of Economic Entomology, 2002, 95: 1333-1336.
- [10] TREMATERRA P, SAVOLDELLI S. Pasta preference and ability to penetrate through packaging of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Dryophthoridae)[J]. Journal of Stored Products Research, 2014, 59: 126-132.
- [11] MARSIN A M, MUHAMAD I I, ANIS S N S, et al. Essential oils as insect repellent agents in food packaging: a review[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(8): 1519-1532.
- [12] 郭福海. 包装用塑料薄膜的耐针孔性[J]. 中国包装, 1982(3): 46-47+41.
GUO F H. Pinhole resistance of plastic film for packaging[J]. China Packaging, 1982(3): 46-47+41.
- [13] CHUNG S K, SEO J Y, LIM J H, et al. Barrier property and penetration traces in packaging films against *Plodia interpunctella* (Hübner) larvae and *Tribolium castaneum* (Herbst) adults[J]. Journal of Stored Products Research, 2011, 47(2): 101-105. 