充气缓冲衬垫的性能及应用研究进展

张健，李琛
（东北林业大学，哈尔滨 150040）

摘要：目的 从材料、充气压力、结构、实际应用等方面论述充气缓冲衬垫在运输包装应用中的研究进展，总结各项因素对充气缓冲衬垫性能的影响及未来研究方向。**方法** 通过查阅国内外学者近年来对充气缓冲衬垫的各项研究报告，对影响充气缓冲衬垫承载与缓冲性能的各项因素，以及实际应用效果的研究结论进行整理总结。**结果** 验证了各项因素对充气缓冲衬垫承载和缓冲性能的影响，其中充气压力的变化对充气缓冲衬垫性能的影响尤为突出，在一定范围内缓冲性能随充气压力的增大而增大；在结构尺寸方面，随气室尺寸增大而增大，同时衬垫性能也受材料不同的影响。**结论** 通过国内外研究现状和进展可知，充气缓冲衬垫的性能随材料、充气压力以及结构尺寸等因素的变化而变化；其综合缓冲性能优于传统缓冲材料，且符合环保理念，有很大的发展与研究前景。

关键词：充气缓冲衬垫；承载；缓冲性能；充气压力；研究进展
中图分类号：TB485.1；TB485.2　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3563(2020)19-0068-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.19.010

Research Progress on Performance and Application of Inflatable Cushion Pad

ZHANG Jian, *LI Chen*
(Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to discuss the research progress of inflatable cushion pad in transportation packaging application from the aspects of materials, inflation pressure, structure, and practical application, and summarize the influence of various factors on the performance of inflatable cushion pad and future research directions. By reviewing various research reports of domestic and foreign scholars on inflatable cushion pad in recent years, the research conclusions on various factors affecting the bearing and cushioning performance of inflatable cushion pad and the actual application effects were summarized. The effect of various factors on the load-bearing and cushioning performance of the inflatable cushion pad was verified. The change in inflation pressure had a particularly prominent effect on the performance of the inflatable cushion pad. Within a certain range, the cushioning performance increased with the increase in inflation pressure. In terms of structural size, the cushioning performance increased as the size of the air chamber increased, and the performance of the gasket was also affected by different materials. According to the research status and progress at home and abroad, it can be known that the performance of inflatable cushion pads changes with factors such as materials, inflation pressure, and structural size and the comprehensive cushioning performance is superior to traditional cushioning materials. The inflatable cushion pad is also in line with environmental protection concepts and has great development and research prospects, providing references for future experimental research.

收稿日期：2020-02-17
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金项目（2572018BL07）；东北林业大学实践教学改革研究项目（20191106）
作者简介：张健（1997—），男，东北林业大学硕士生，主攻运输包装技术。
通信作者：李琛（1979—），女，东北林业大学副教授，主要研究方向为运输包装技术。

KEY WORDS: inflatable cushion pad; bearing and cushioning performance; inflation pressure; research progress

充气缓冲衬垫是一种通过向塑料薄膜中充入气体，形成连续均匀凸起的气泡（柱）的新型承载与缓冲材料[1]。根据材料、形状、制作工艺等不同分为泡状充气缓冲衬垫（气泡膜）和柱状充气缓冲衬垫（气柱袋），是目前唯一完全透明的新型环保材料[2]，可利用热封设计形成特定全面缓冲包装。近年来充气缓冲衬垫已广泛应用于多种产品的缓冲包装，其承载与缓冲作用主要依赖于内部压缩气体和表层薄膜。当受到外界力的作用时，薄膜结构承受冲击和载荷，内部气体吸收冲击能量[3]，从而达到保护被包装物的目的。

随着包装和快递行业的迅速发展，充气缓冲衬垫因其良好的缓冲性能，以及呼应国家关于绿色缓冲包装材料的行业政策，广泛应用于各类产品的缓冲包装[4]。该类材料的研究以提升承载与缓冲性能为目的，针对其实际应用效果及各类影响因素：初始充气内压、气垫尺寸、蠕变性[5]、环境条件、静态刚度[6]及动态刚度等展开研究。文中将从以上方面论述充气缓冲衬垫的性能及应用研究进展，并对今后的研究提出一些新的建议。

1　影响承载与缓冲性能的因素

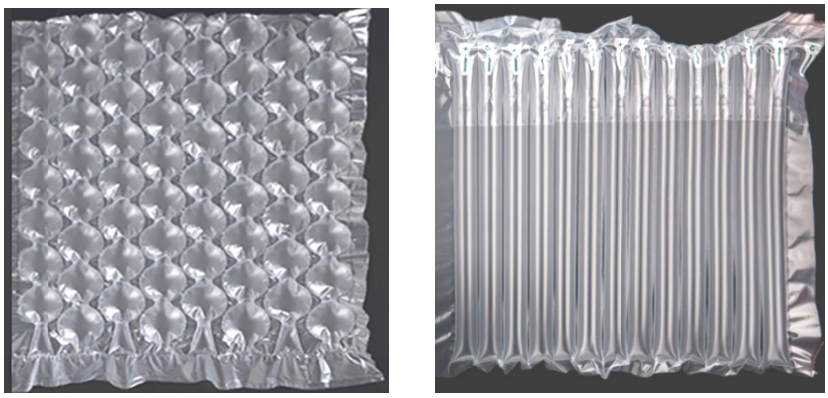
通过对柱状充气缓冲衬垫与泡状充气缓冲衬垫 2 类不同类型的衬垫进行展开研究各项因素对其承载与缓冲性能的影响情况，2 类气垫充气后实物见图 1。

1.1　充气缓冲衬垫的材料

1）柱状充气缓冲衬垫。最初的柱状充气缓冲衬垫是以聚氯乙烯薄膜为原材料[7]，采用高频内压工艺成形，在其内部充填氮气[4]，具有防振防磨损的性能。后来逐步发展为选用 PA 以及多层 PE 复合材料作为充气缓冲衬垫薄膜，并因其良好的柔性与弹性以及高强度、耐磨损的特性克服了充气缓冲衬垫受温度变化而带来的不利影响[8]。徐健等[9]将水溶性 PVA（聚乙烯醇）薄膜与高强度牛皮纸进行复合，并以该材料制成一种缓冲气柱袋，通过试验验证其具有良好的缓冲性能。王江彦等[10]以废弃空气垫复合薄膜为原料，采用 LLDPE 接枝马来酸酐为相容剂，制备出具有良好性能的再生共混薄膜，该类薄膜可替代 LLDPE 单膜。

2）泡状充气缓冲衬垫。气泡膜的材料主要选用高分子聚乙烯和聚烯烃。材料的研究主要针对赋予其某种特性，如抗静电、阻燃、隔热等。国内的山东淄博塑料七厂[11]以 LDPE 与聚烯烃色母料为原材料，研制出单面大泡、双面大泡、单面小泡、双面小泡 4 种类型薄膜。英国采用双层 LDPE，其中一层 LDPE 为气泡状，并附以涂层，防止气体流失，得到一种轻型缓冲包装材料[12]。朱阿四[13]以添加防静电剂的 EPE(珍珠棉)为材料与气垫膜进行复合，形成一种新型防静电气垫薄膜。朱阿四[14]又以屈服、拉伸和压缩强度及硬度高于聚乙烯的聚丙烯编织布为表层，气垫薄膜为底层，制成一种新型复合双层薄膜，经测试其整体缓冲及力学性能均有所提高。

现如今气柱袋材料多为复合薄膜，包括 PE 膜、PVDC（聚偏二氯乙烯）膜、PA 膜、PA/PE 共挤膜（五层及七层）等。对于材料的研究，更侧重于以被包装物需求为出发点进行有针对性的改良与优化，且更注重材料的环保性。泡状充气缓冲衬垫通过选用不同的原材料或进行材料改性，提高其使用性能。目前仍以 PE 类材料为主，包括 LLDPE（线性低密度聚乙烯）、HDPE（高密度聚乙烯）、LDPE（低密度聚乙烯）、mLLDPE（茂金属线性低密度聚乙烯）以及 PO（聚烯烃）膜。



a 泡状充气缓冲衬垫　　b 柱状充气缓冲衬垫

图 1　充气缓冲衬垫充气后实物

Fig.1 Physical picture of the inflatable cushion pad after inflation

1.2 充气缓冲衬垫的充气压力

由于气体受压缩变形和薄膜拉伸变形相互耦合作用，充气缓冲衬垫在受到冲击载荷时会产生变形[15]。在其他变量一定时，初始充气压力为决定衬垫缓冲防护性能的主要因素，其通过影响衬垫的动态刚度，导致冲击变形发生变化，最终决定衬垫性能。国内外学者通过静态压缩试验、动态压缩试验、冲击测试、构建模型、振动试验等多种方式研究了充气压力与充气量对该类材料承载与缓冲性能的影响。

1）柱状充气缓冲衬垫。赵德坚[7]以 2 种不同规格的 PVDC/PVC 复合膜单气室气柱袋为试验对象，通过动态、静态压缩试验研究充气量对气柱袋缓冲特性的影响，得出在一定衬垫尺寸规格限制下，最小动静态缓冲系数随充气量的增加而增大。郭振斌[16]在此基础上以初始内压、衬垫规格为变量对气柱袋进行研究，并将动态压缩试验得出动态刚度值与理论值比较。得出在气柱袋规格相同的情况下，动态刚度随初始内压的增加而增大；大体上理论值较实际所得数值较小，而在初始内压较小时，两者吻合较好。王慧[17]对不同充气压力气柱袋进行跌落冲击试验，结果显示，当跌落高度和气柱结构尺寸一定时，一定限度内气柱袋的缓冲性能随充气压力的增大而提高；当压力过大时易造成多次冲击，导致缓冲性能下降。

沈剑锋[1]探究气柱袋在准静态压缩条件下的应力-应变关系，得出气柱袋性能受充气压力的影响，总体上充气压力的增大使气柱袋承载力得到提高。王雪芬等[18]基于准静态压缩试验对比不同因素对气柱袋承载与缓冲特性的影响，得出充气压力的影响最为显著。范珺[19]参考 GB/T 8168 方法 A，对一款具有 7 个承载气室的气柱袋进行静态压缩试验，计算其压缩应力和压缩应变，得出一定范围内增大充气压力能够提升气柱袋的承载能力。周加彦等[20]也得出类似结论。在一定范围内，气柱袋缓冲包装的承载能力随内部充气压力的增大而增大。巩桂芬[21]基于静态压缩试验，研究了气柱袋的破损强度，得出针对厚度尺寸较小的气柱袋，应增大其初始压力，宽度尺寸大的气柱袋应降低初始充气压力。

任冬远[22]优化改进了空气柱原有圆柱模型，并验证其合理性，研究发现气柱袋所能承受的内压与尺寸呈反比。在静态压缩过程中，初始内压越大，缓冲系数越小；超过 60 kPa 时变化不明显；动态压缩过程中，缓冲特性随初始内压的增大而有所提高。郭振斌[16]建立了一种超弹性理论试验模型，通过其预测气柱袋静态刚度与初始相对内压、压缩刚度和变形量的关系，并将静态压缩变形量试验数值与理论值进行比较，得出静态刚度在压缩变形量较小的情况下预测较为准确。陈鸣等[23]通过建立超弹性本构模型，分析 PE/PA/PE 复合薄膜气柱袋缓冲效果与所充气体压力的关系。得出充气压力增加，气垫承载力增加；但也受范围的影响，在某范围内充气压力越小，缓冲性反而越好。吴芳英等[24]通过有限元方法分析气柱袋的静态缓冲性能，得到压缩量与应力分布和变形之间的规律。结果表明，小规格气柱袋受充气压力的影响较为显著。谷吉海等[15]基于柱状充气缓冲衬垫受冲击通过气室变形和薄膜拉伸吸收能量这一原理建立力学模型，并以冲击试验验证模型真实可靠性。结果表明，在一定范围之内，缓冲性能随着气室内充气压力值的增大而增强，具体变化情况为充气压力增加 20 kPa，冲击缓冲载荷下降 10%。

同时部分人员针对压力与振动、蠕变性、临界值的关系进行了研究。巩桂芬等[25]以 3~100 Hz 区间的频率对柱形空气缓冲衬垫和确定载荷质量形成的振动系统进行正弦扫频振动试验，分析初始内压对其振动传递特性的影响规律，得出 3 种初始内压下振动系统的共振频率均在 35 Hz 左右，传递率峰值集中在 11 Hz 左右，即隔振效果基本不受充气压力变化的影响。Saito K[26]研究了气垫的蠕变性以及内部压力、环境温湿度与其缓冲性能的关系。万志敏等[27]研究发现了气囊刚度稳态过渡的临界值，以其作为初始内压，效果良好。

2）泡状充气缓冲衬垫。Esgar 和 Morgan[28]研究了不同形状充气袋初始内压与冲击响应最大加速度之间的关系，得出初始内压的增大导致最大加速度减小，具体变化情况为：初始内压与外界气压比大于 1.4 时，变化平缓；初始内压与外界气压比小于 1.4 时，变化明显。Mitsuda T [29]发现充气袋常用初始相对内压一般在 20 ~ 50 kPa 之间，并通过试验得出内压为 40 kPa 时性能较优。

普遍的研究结论表明，充气压力在一定范围内的增大有利于提高缓冲材料的承载与缓冲性能，这一范围受其规格尺寸影响；同时模型的建立揭示了初始压力与缓冲系数的关系。

1.3 充气缓冲衬垫的结构特性

气柱袋组成部分包括气柱、单向阀、充气口与充气通道，见图 2。通过热封成型方式将其分割成一个个独立的气室，常见的气室宽度有 2，3，4，6，8，10，12 cm 等；在市场应用中，根据产品尺寸进行衬垫结构尺寸的选择，从而达到包装需求。气泡膜的结构多为连续葫芦状及独立枕状，且膜上附有可撕扯虚线，使用时根据实际需要进行撕扯及适当拉伸，对产品进行缠绕包装，达到 360°无死角的全方位保护。

1）柱状充气缓冲衬垫。针对于柱状充气缓冲衬垫，从各项结构参数变量的影响进行了以下的研究。方旭红等[30]以 PE/PA/PE 三层共挤薄膜气柱袋为材料，分析其动态缓冲特性变化，以跌落高度和结构尺寸为变量进行试验。结果显示，跌落高度一定时，随

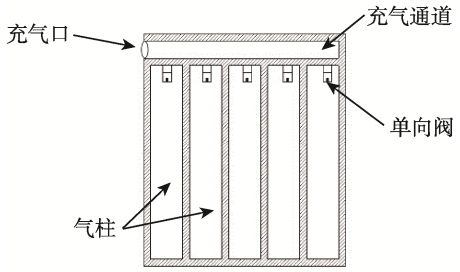


图 2　气柱袋结构示意
Fig.2 Schematic diagram of the air column bag structure

着气室宽度增大，气柱袋能够承受的静应力值变大，而冲击加速度最大值变小。巩桂芬等[21]研究了气柱袋规格与耐压强度之间的关系，得出宽度相同时，耐压强度随长度增大而增大；长度相同时，耐压强度随厚度减小而增大。陈梓垠等[31]通过动态压缩试验和应力-能量法研究不同薄膜厚度柱状充气缓冲衬垫的动态缓冲性能和承载力，试验结果显示厚度的增大会提高衬垫的承载与缓冲性能。吴芳英等[24]以有限元方法模拟气柱袋静态缓冲性能，得出在压缩量相同的情况下，气柱袋结构尺寸越小，其压缩载荷越大；结构尺寸越大，承载力越强。张荣等[32]研究了逆止阀结构以及热封合质量对 PET/PA/PET 复合薄膜气柱袋密封性的影响，得出导致内装气压下降的主要原因为逆止阀处的气体泄漏，而热封合质量影响极微。

2）泡状充气缓冲衬垫。针对泡状衬垫，主要对整体结构进行了研究。Sasaki 等[33]对一种双气室空气衬垫进行动静态压缩试验，探究了缓冲系数与气室尺寸的关系。T.Kitamura[34]介绍了一款双层空气袋，里层贴合产品外形，层与层之间充气，多次试验表明这种气垫防护性良好。Sasaki 等[33]以单层可变化的 PU 气室、单层密闭的空气室制造出一种新型缓冲结构，克服了气室在受压情况下压力过大的问题。

在整体结构上的研究表明，多层复合气泡膜结构能够起到良好的防护作用；在各项细节结构变量上的研究表明，气柱袋所能承受的静应力值随着气室宽度、长度以及薄膜厚度的增加而得到提升，同时逆止阀结构的优劣也在一定程度上影响着内部气压的变化。

1.4　实际应用中缓冲与承载性能分析

在应用方面，通常利用充气缓冲衬垫、瓦楞纸板、纸浆模塑材料[35]、泡沫塑料等传统缓冲材料对家电产品、计测产品等进行包装设计，并以动态、静态压缩试验对其进行测试，对比其性能。

1）柱状充气缓冲衬垫。美国德州大学的结构力学实验室[36]利用跌落模拟冲击，比较圆柱状充气袋与发泡塑料的性能优劣。其中，Matlock 等[37]初步研究了其在恒压条件下的性能。Turnbow 等[38]则从能量消耗角度对充气袋性能进行了分析。Takahashi[39]通过振动试验和跌落试验，验证了该类衬垫的优良性能。Arai T 等[40]介绍了一种单向阀结构气柱袋，并通过冲击及振动试验验证其缓冲性能优良，在 3~20 Hz 范围时，充气衬垫的隔振性优于泡沫材料；同时指出其节约空间的优点。Nakagawa K[41]对计测机器等进行了充气缓冲包装设计，并进行了跌落试验，得出跌落高度在 70 cm 范围内时，相应的缓冲包装均能满足实际要求。

伍志祥[42]比较柱状充气缓冲衬垫与泡沫塑料包装小型电子产品时的性能指标，结果表明，柱状充气缓冲衬垫包装的产品所承受的压力和加速度峰值较小；高频时缓冲防护性能优于泡沫塑料。许宏伟等[43]对硒鼓缓冲气柱包装件进行了冲击试验，以高速图像测试技术进行数据分析，得出气柱袋有效地降低了硒鼓的响应加速度，使其免受外界力的破坏。梁秀[44]利用气柱袋对空机框进行了缓冲包装防护设计，验证了其良好的缓冲性能和隔振性能，此外证明了单个气柱损坏不会影响整体缓冲性能。王雪芬[18]介绍了气柱袋的组成要素及制作工艺，并通过静态压缩试验和跌落试验评估了不同规格气柱袋的力学行为，最终以包装设计六步法为依据，进行了葡萄酒瓶包装设计，以跌落试验验证其设计可行性。韩爱林等[45]以气柱线密度、气柱直径、气柱压力为变量，测定其对柱状充气缓冲衬垫复原性能的影响，并与 EPS、蜂窝纸板进行比较，得出在冰箱包装侧条材料方面的应用，充气缓冲衬垫将取代 EPS 和蜂窝纸板。

2）泡状充气缓冲衬垫。郝喜海等[46]研究了高强度牛皮纸/水溶性 PVA 复合充气袋，并以静态压缩试验、跌落试验证明了其良好的缓冲性能，可满足各类工业产品防护需求。Kitamura T [34]介绍了一款可重复使用的双层充气袋，其外形与被包装物相近，使用时在其内部充入气体，形成具有良好缓冲作用的充气衬垫结构。Siripong Malasri 等[47]通过跌落试验得出在医疗用品包装箱顶部放置充气袋可以有效限制内部产品跳动，且减缓效果优于在底部增加充气袋。Lino Y [48]对气泡薄膜进行了持续的受压试验，经过 1 个月的持续受压，气垫的厚度基本保持不变。Minoguchi S[49]以静态压缩试验探究泡状充气缓冲衬垫抗压性能，得出在静应力高于 50 kg/m^2 时，气垫厚度随应力的增加而下降。Yamashiro H[50]通过材料拉伸、封合强度、堆码、静态压缩等多种试验方法证明了气泡薄膜良好的抗压稳定性。周祥兴[51]介绍了一种气泡薄膜，阐述了生产工艺及应用情况，并测试了在一定载荷下 7 d ~ 3 个月内其厚度的变化，验证了其良好的缓冲性能。刘占胜等[6]比较了充气衬垫和聚苯乙烯泡沫塑料作为洗碗机包装时的缓冲性能，得出高频时充气衬垫缓冲性能较好，且跌落时的加速度峰值低于聚苯乙烯泡沫塑料。

通过一系列的跌落、振动、持续受压、静态压缩、

堆码以及对薄膜拉伸试验、对整体结构封合强度试验表明充气缓冲衬垫具有良好的承载与缓冲性能；同时以实际产品为被包装物进行真实运输环境模拟测试，并与传统缓冲材料进行对照，进一步验证了其良好的缓冲与抗振性能。同时总结各项试验操作复杂之处以及现今仿真技术在各领域的逐步完善应用[52]，包装仿真测试必将稳步发展。

2 研究难点及趋势分析

2.1 加强其应对振动破坏的研究

众多产品破损案例的调查与分析表明，振动是产生破损的主要原因。传统的运输包装设计更侧重缓冲性能，防振性能则仅进行被动隔振设计或校核是否发生共振，因此应加强两者的结合设计。

2.2 加强其设计标准化的研究

综合国内外的研究，充气缓冲衬垫的性能受到来自多方因素，如流通环境、整体包装、产品特性的考验。国内外的研究主要以试验法为主，缺乏定量研究，未有一个标准来规定充气压力，结构尺寸，热封方式等参数以达到最佳缓冲效果。

目前，该类充气材料的制备主要依企业的经验而定，充气压力等重要指标也仅仅满足于常规应用而处于一个范围内；针对于精密仪器很难提供一个好的缓冲效果。标准的制定则需结合缓冲材料脆值、产品特性多方面进行精密计算，难度大，尚未得到解决，应加强此项内容的研究。

2.3 加强充气缓冲衬垫在空气动力学方面的研究

目前的试验并未很好地解释其缓冲机理。传统的研究趋向于静态压缩试验，过于保守，难以还原真实运输环境。今后的研究应更侧重于高速冲击与振动的结合，以获得更为准确的动态应力与应变，同时利用数学模型更加精准地表述整个缓冲过程及能量的转化。

2.4 加强在仿真领域的研究

利用计算机建立模型模拟真实运输环境成为包装设计的主流趋势。目前该方面的研究主要为实际物理试验的辅助，通过建立充气缓冲衬垫力学模型，进一步验证各项指标研究结论。但其公式内容过于隐晦，且形式较为单一，很难真正地投入实际应用与生产测试中，因此应结合以往研究，配合空气动力学加强在仿真领域的研究。

3 结语

充气缓冲衬垫薄膜材料包括 PE 膜、PA 膜、PO 膜、PVDC 膜、PA/PE 共挤膜（五层及七层），不同的材料应用于不同需求的被包装物品。随着充气压力、气室尺寸、材料等因素的改变，充气缓冲衬垫的性能受到一定的影响，其中充气压力在一定范围内的提高有利于提高衬垫的缓冲性能，气室尺寸以及薄膜厚度的提高也在一定程度上提升了衬垫的性能。同时，通过对充气缓冲衬垫实际应用的研究，也验证了其优于传统缓冲衬垫的结论，其发展必将成为一大趋势，但其在各项性能的深入研究、标准制定、空气动力学以及仿真领域仍有待科研工作者开展深入系统的研究。

参考文献：

[1] 沈剑锋. 空气垫基本力学与缓冲性能试验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 1—21.
SHEN Jian-feng. Experimental Research on the Basic Mechanics and Cushioning Performance of Air Cushion[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008: 1—21.

[2] 刘忠. 笔记本电脑缓冲包装材料的种类及性能[J]. 中国包装工业, 2015(11): 48.
LIU Zhong. Types and Properties of Laptop Computer Buffer Packaging Materials[J]. China Packaging Industry, 2015(11): 48.

[3] GUNAWAN F E. Numerical Modelline and Experimental Verification of Airbag for Packaging Material Application[J]. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2012, 7(1): 64—68.

[4] 辛丽颖. 缓冲包装材料的应用及发展[J]. 印刷技术, 2016(10): 42—43.
XIN Li-ying. Application and Development of Buffer Packaging Materials[J]. Printing Technology, 2016(10): 42—43.

[5] KANG Yong-gang. Air Filled Cushioning Material, Structures and Properties[J]. Proceedings of the 17th IAPRI World Conference on Packaging, 2010, 4(12): 243—246.

[6] 刘占胜, 宋海燕, 李光, 等. 洗碗机的缓冲包装[J]. 中国包装, 2004, 24(1): 66—67.
LIU Zhan-sheng, SONG Hai-yan, LI Guang, et al. Buffer Packaging for Dishwashers[J]. China Packaging, 2004, 24(1): 66—67.

[7] 赵德坚. 充气量对充气缓冲包装垫缓冲性能的影响研究[J]. 包装工程, 2011, 32(13): 32—34.
ZHAO De-jian. Research on the Impact of Inflated Volume on the Buffer Performance of Inflatable Buffer Packaging Mats[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13): 32—34.

[8] 雷杰, 李鑫, 李杰. 新型充气式防震包装的研究[J]. 包装世界, 2005, 23(1): 34—35.
LEI Jie, LI Xin, LI Jie. Research on New Inflatable Shockproof Packaging[J]. Packaging World, 2005,

23(1): 34—35.

[9] 徐健, 刘晓玉, 王保升. 缓冲气柱袋在运输包装中的应用设计及研究现状[J]. 印刷技术, 2016(4): 40—42.
XU Jian, LIU Xiao-yu, WANG Bao-sheng. Application Design and Research Status of Buffer Gas Column Bag in Transportation Packaging[J]. Printing Technology, 2016(4): 40—42.

[10] 王江彦. 废弃缓冲空气垫材料的再生研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014: 17—30.
WANG Jiang-yan. Regeneration of Waste Cushioning Air Cushion Material[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2014: 17—30.

[11] 张奎起. 新型包装材料气垫薄膜的研制[J]. 塑料工业, 1990(1): 53—54.
ZHANG Kui-qi. Development of a New Packaging Material Air Cushion Film[J]. Plastic Industry, 1990(1): 53—54.

[12] 张奎起. 气垫式包装材料[J]. 塑料工业, 1990(1): 53—54.
ZHANG Kui-qi. Air Cushion Packaging Materials[J]. Plastic Industry, 1990(1): 53—54.

[13] 朱阿四. 防静电 EPE 复合双层防静电气垫薄膜: 中国, 200920039649.9[P]. 2010-03-24.
ZHU A-si. Antistatic EPE Composite Double-layer Antistatic Air Cushion Film: China, 200920039649.9 [P]. 2010-03-24.

[14] 朱阿四. 编织布复合双层气垫薄膜: 中国, 200920039646.5[P]. 2010-03-24.
ZHU A-si. Woven Cloth Composite Double-layer Air Cushion Film: China, 200920039646.5[P]. 2010-03-24.

[15] 谷吉海, 田野, 高翔, 等. 充气压力对空气衬垫缓冲防护性能的影响研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(20): 226—230.
GU Ji-hai, TIAN Ye, GAO Xiang, et al. Research on the Effect of Inflation Pressure on the Cushion Protection Performance of Air Cushions[J]. Vibration and Shock, 2016, 35(20): 226—230.

[16] 郭振斌. 缓冲气垫包装系统振动机理及特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 19—24.
GUO Zhen-bin. Research on Vibration Mechanism and Characteristics of Cushion Air Cushion Packaging System[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012: 19—24.

[17] 王慧. 空气衬垫的缓冲防护机理与冲击特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2014: 33—38.
WANG Hui. Research on the Cushioning Protection Mechanism and Impact Characteristics of Air Cushion[D]. Harbin: Harbin Commercial University, 2014: 33—38.

[18] 王雪芬. 瓶装产品的充气袋包装研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 51—64.
WANG Xue-fen. Research on Inflatable Bag Packaging for Bottled Products[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 51—64.

[19] 范珺. 空气垫缓冲包装承载性验证及影响分析[J]. 上海包装, 2016(6): 41—42.
FAN Jun. Carrying Capacity Verification and Impact Analysis of Air Cushion Packaging[J]. Shanghai Packaging, 2016(6): 41—42.

[20] 周加彦, 范珺. 空气垫缓冲包装承载性验证及影响分析[J]. 中国包装, 2016, 36(5): 48—50.
ZHOU Jia-yan, FAN Jun. Carrying Capacity Verification and Impact Analysis of Air Cushion Packaging[J]. China Packaging, 2016, 36(5): 48—50.

[21] 巩桂芬, 刘萌沛. 充气垫缓冲材料破损强度研究[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2015, 33(3): 149—153.
GONG Gui-fen, LIU Meng-pei. Research on the Breaking Strength of Inflatable Cushioning Buffer Material[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 33(3): 149—153.

[22] 任冬远. 空气垫在受到跌落冲击时的缓冲机理及性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 27—48.
REN Dong-yuan. Research on the Cushioning Mechanism and Performance of Air Cushion When Subjected to Drop Impact[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008: 27—48.

[23] 陈鸣, 彭雄奇, 石少卿, 等. 薄膜超弹性本构模型及其在空气垫中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(6): 883—887.
CHEN Ming, PENG Xiong-qi, SHI Shao-qing, et al. Super elastic Thin Film Constitutive Model and Its Application in Air Cushion[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(6): 883—887.

[24] 吴芳英, 范小平, 向红, 等. 空气垫静态缓冲性能的数值模拟[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 11—15.
WU Fang-ying, FAN Xiao-ping, XIANG Hong, et al. Numerical Simulation of Static Cushioning Performance of Air Cushion[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 11—15.

[25] 巩桂芬, 李超. 柱形空气衬垫振动传递特性的试验研究[J]. 包装工程, 2019, 40(19): 92—96.
GONG Gui-fen, LI Chao. Experimental Study on Vibration Transmission Characteristics of Cylindrical Air Cushion[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(19): 92—96.

[26] SAITO K. New Air-cushioning Material[J]. JPI Journal, 1998, 36(10): 1010—1016.

[27] 万志敏, 王莉, 谢志民, 等. 缓冲气囊的特征内压[J]. 力学与实践, 1998(6): 19—21.
WAN Zhi-min, WANG Li, XIE Zhi-min, et al. Characteristic Internal Pressure of Cushion Airbag[J]. Mechanics in Engineering, 1998(6): 19—21.

[28] ESGAR J B, MORGAN W C. Analytical Study of Soft Landing on Gas-filled Bags[R]. Cleveland: Lewis Research Center, 1960.

[29] MITSUDA T. Characteristics of the AIR CHAIN for Package Design[J]. JPI Journal, 1991, 29(12): 1345—

1351.

[30] 方旭红，谢玉兵. 冰箱缓冲包装优化设计研究[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2015(8): 169.
FANG Xu-hong, XIE Yu-bing. Study on Optimization Design of Refrigerator Buffer Packaging[J]. Small and Medium-sized Enterprise Management and Technology (Late Edition), 2015(8):169.

[31] 陈梓垠，王玉龙，梁秀. 空气柱衬垫缓冲性能研究[J]. 绿色包装, 2017(9): 51—55.
CHEN Zi-yin, WANG Yu-long, LIANG Xiu. Study on Cushioning Performance of Air Column Cushion[J]. Green Packaging, 2017(9): 51—55.

[32] 张荣，张新昌. 塑料薄膜气垫密封性能及其影响因素研究[J]. 塑料工业, 2019, 47(11): 92—97.
ZHANG Rong, ZHANG Xin-chang. Study on the Sealing Performance of Plastic Film Air Cushion and Its Influencing Factors[J]. Plastic Industry, 2019, 47(11): 92—97.

[33] SASAKI H, SAITO K, ABE K. Development of An Air Cushioning Material Based on a Novel Idea[J]. Packaging Technology and Science, 1999, 12(3): 143—150.

[34] KITAMURA T. ACP: Reusable Film Packaging[J]. JPI Journal, 2003, 41(4): 308—311.

[35] 陆新宗，肖生苓，王全亮，等. 漆酶对杨木纸浆模塑包装材料抗张性能的影响[J]. 森林工程, 2018, 34(2): 54—59.
LU Xin-zong, XIAO Sheng-ling, WANG Quan-liang, et al. The Effect of Laccase on the Tensile Properties of Poplar Pulp Molding Packaging Materials[J]. Forest Engineering, 2018, 34(2): 54—59.

[36] MATLOCK H, RIPPERGER E A, TURNBOW J W, et al. Energy-absorbing Materials and System. Part II[R]. Austin: Structural Mechanics Research Laboratory, 1957.

[37] MATLOCK H, THOMPSON J. Preliminary Tests on the Non-pressurized Air Bag[R]. Austin：Structural Mechanics Research Laboratory, 1957.

[38] TURNBOW J W, OGLETREE W B. The Energy-dissipating Characteristics of Airbags, Part III[J]. Structural Mechanics Research Laboratory. The University of Texas, 1959, 6(22): 168—169.

[39] TAKAHASHI. Development of Environment-friendly Cushioning Materials[J]. JPI Journal, 1997, 35(2): 166—173.

[40] ARAI T, KONO M. A Brand New Shock Absorbing Material[J]. JPI Journal, 1993, 31(8): 891—897.

[41] NAKAGAWA K. Application of Air-cushioning Material AIR CHAIN[J]. JPI Journal, 1993, 31(8): 884—890.

[42] 伍志祥，许晓春，陆佳平. 单向排气和充气技术在包装中的应用[J]. 包装学报, 2011, 3(4): 15—18.
WU Zhi-xiang, XU Xiao-chun, LU Jia-ping. The Application of Unidirectional Exhaust and Inflation Technology in Packaging[J]. Packaging Journal, 2011, 3(4): 15—18.

[43] 计宏伟，王心宇，王佼，等. 硒鼓缓冲气柱包装冲击响应与变形行为的图像测量分析[J].振动与冲击, 2012, 31(19): 151—155.
JI Hong-wei, WANG Xin-yu, WANG Jiao, et al. Image Measurement and Analysis of Shock Response and Deformation Behavior of Toner Cartridge Cushioning Gas Column Package[J]. Vibration and Shock, 2012, 31(19): 151—155.

[44] 梁秀. 空气柱衬垫缓冲性能研究[D]. 武汉：武汉大学, 2017: 42—49.
LIANG Xiu. Research on Cushioning Performance of Air Column Cushion[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017: 42—49.

[45] 韩爱林，蔡训儒，胡海梅，等. 气垫缓冲包装在冰箱上的应用[J]. 日用电器, 2017(8): 58—61.
HAN Ai-lin, CAI Xun-ru, HU Hai-mei, et al. Application of Air Cushion Cushioning in Refrigerator[J]. Consumer Electronics, 2017(8): 58—61.

[46] 郝喜海，马力，唐芬南，等. 新型绿色缓冲包装材料及生产设备的研究[J].中国包装工业，2000(7): 30—33.
HAO Xi-hai, MA Li, TANG Fen-nan, et al. Research on New Green Buffer Packaging Materials and Production Equipment[J]. China Packaging Industry, 2000(7): 30—33.

[47] MALASRI S, AUNG P, MOSER K, et al. Subsequent Impact Acceleration Analysis of Air Pillow Study[C]// Mid-South Annual Engineering and Sciences Conference, Christian Brothers University, Mamphis, Tennessee, 2012.

[48] LINO Y. Air-cushioning Material from JSP[J]. JPI Journal, 1988, 4(12): 1274—1275.

[49] MINOGUCHI S. Air Bubble Sheet in Shrink Packaging[J]. JPI Journal, 1989, 27(4): 479—483.

[50] YAMASHIRO H. Cushion Filler TRICONE[J]. JPI Journal, 1989, 27(2): 291—294.

[51] 周祥兴. 气垫薄膜[J]. 中国包装工业，2002, 97(7): 26—27.
ZHOU Xiang-xing. Air Cushion Film [J]. China Packaging Industry, 2002, 97(7): 26—27.

[52] 丁建梅，胡永冉，丁建华，等. 基于 ANSYS 水稻覆膜直播机机架的有限元分析[J]. 森林工程，2020, 36(4): 58—63.
DING Jian-mei, HU Yong-ran, DING Jian-hua, et al. Finite Element Analysis Based on ANSYS Rice Mulching Direct Seeding Machine Frame[J]. Forest Engineering, 2020, 36(4): 58—63.